

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

**Návrh a realizace regulačního obvodu na fyzikálním
modelu tří nádrží pomocí kompaktního
programovatelného automatu WinPac-8000**

**Design and Implementation of Control Circuit on Three
Tanks Model Using Programmable Compact Controller
WinPac-8000**

Ostrava, 2010

Bc. Michal PREJZEK

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Prejzek**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Návrh a realizace regulačního obvodu na fyzikálním modelu tří nádrží pomocí kompaktního programovatelného automatu WinPac-8000**
Design and Implementation of Control Circuit on Three Tanks Model Using Programmable Compact Controller WinPac-8000

Zásady pro vypracování:

1. Studium základních metod syntézy zpětnovazebních regulačních obvodů a metod moderní teorie řízení.
2. Seznámení se s matematickým a fyzikálním modelem, linearizace systému v pracovním bodě.
3. Volba typu regulátoru, návrh regulátoru a simulace regulačního obvodu v prostředí REX + Simulink.
4. Realizace navrženého algoritmu na programovatelném automatu WinPAC-8000 s využitím řídicího systému REX.
5. Vizualizace ve vybraném vizualizačním systému SCADA/HMI.
6. Zhodnocení, závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. XUE, D. - CHEN, Y. - ATHERTON, D. P. *Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB*. 1st. ed. Philadelphia(USA): Society for Industrial Mathematics, 2008. 356 s. ISBN 0898716381/978-0-898716-38-2.
2. NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. 1. vyd. Ostrava: MONTANEX, a. s., 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
3. VÍTEČKOVÁ, M. - VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 243 s. ISBN 978-80-248-1924-2.
4. VAVŘÍN, P. *Teorie automatického řízení I (Lineární spojité a diskrétní systémy)*. 2. přepracované vyd. Brno: VUT Brno, 1991. 158 s. ISBN 80-214-0244-X.
5. VAVŘÍN, P. *Teorie dynamických systémů*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1989. 177 s.
6. ZÍTEK, P. - HOFREITER, M. - HLAVA, J. *Automatické řízení*. 2. vyd. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 148 s. ISBN 80-01-02044-4.
7. ŠULC, B. *Teorie automatického řízení s počítačovou podporou*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 154 s. ISBN 80-01-01974-8.
8. Firemní dokumentace Matlab and Simulink (MathWorks).
9. Firemní dokumentace Rex Controls.
10. Firemní dokumentace ICP DAS k programovatelným automatům.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Štěpán Ožana, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....
Michal Prejzek

Datum odevzdání diplomové práce : 6. května 2011

Poděkování

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Štěpánu Ožanovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou regulace vodní hladiny ve třech spojených nádržích prostřednictvím programovatelného automatu WinPac-8000. Hlavním cílem je návrh a realizace regulátoru na kontroleru WinPAC-8000 s využitím řídicího systému REX. Dalším důležitým cílem bylo vytvořit pro danou soustavu vizualizaci ve vybraném vizualizačním systému SCADA/HMI.

Klíčová slova

PID regulátor, prediktivní regulátor, Matlab, Matlab/Simulink, RexDraw, RexView, linearizace systému, Luenbergerův pozorovatel.

Abstract

This thesis deals with the regulation of water levels in the three tanks control by a PAC WinPac-8000. The main aim is to design and implement control algorithm based on REX Control system. Another part was to create a visualization of the system in the selected visualization SCADA / HMI.

Key words

PID controller, predictive controller, Matlab, Matlab/Simulink, RexDraw, RexView, linearization of the system, Luenberger observer.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Gs	spojitý přenos linearizované soustavy	
A	matice vnitřních vazeb systému	
B	matice vazeb vstupů na stavy systému	
C	matice vazeb stavů systému na výstupy	
D	matice přímých vazeb mezi vstupy výstupy	
L	matice Luenbergerova pozorovatele	
w(t)	řídící signál, požadovaná veličina	
u(t)	akční zásah	
e(t)	regulační odchylka	
y(t)	skutečná měřená hodnota	
h	výška hladiny	[m]
Q	přítok	[m ³ /s]
D	střída (duty)	[%]
f	frekvence	[Hz]
U	napětí snímače	[V]
t(s)	čas	
Kx	zesílení prediktivního zesilovače řídící veličiny	
Kr	zesílení prediktivního zesilovače stavových veličin	
Gr	přenos spojitého regulátoru	
PI	spojitý proporcionálně integrační regulátor	
PS	diskrétní proporcionálně sumační regulátor	
MPC	model predictive control – prediktivní regulátor	
zoh	Zero-order hold on the inputs – tvarovač nultého řádu	
PWM	pulse width modulation – pulsně šířková modulace	
PAC	Programmable Automation Controller – programovatelný automat	

Obsah

1	ÚVOD	- 1 -
2	SOUSTAVA TŘÍ NÁDRŽÍ	- 2 -
2.1	REALIZACE REÁLNÉ SOUSTAVY	- 3 -
2.1.1	<i>Elektronika modelu pro čerpadlo</i>	<i>- 3 -</i>
2.1.2	<i>Řízení pomocí PWM signálu</i>	<i>- 5 -</i>
2.1.3	<i>Snímač hladiny</i>	<i>- 6 -</i>
2.2	ODVOZENÍ MATEMATICKÉHO MODELU	- 7 -
2.3	ŘÍZENÍ REÁLNÉ SOUSTAVY	- 10 -
2.4	ŘÍDICÍ APLIKACE V PROGRAMOVATELNÉM AUTOMATU WINPAC	- 12 -
3	PROGRAMOVATELNÝ AUTOMAT WINPAC-8000	- 14 -
3.1	PARAMETRY	- 14 -
3.2	MODUL I-8017HW	- 15 -
3.3	MODUL I-8088W	- 16 -
3.4	ŘÍDICÍ SYSTÉM REX	- 17 -
3.4.1	<i>RexCore</i>	<i>- 18 -</i>
3.4.2	<i>RexView</i>	<i>- 18 -</i>
3.4.3	<i>RexDraw</i>	<i>- 18 -</i>
4	NÁVRH A REALIZACE REGULÁTORU	- 20 -
4.1	PREDIKTIVNÍ REGULÁTOR	- 20 -
4.1.1	<i>Návrh prediktivního regulátoru</i>	<i>- 20 -</i>
4.2	PS REGULÁTOR	- 26 -
4.2.1	<i>Návrh spojitého PI regulátoru</i>	<i>- 26 -</i>
4.2.2	<i>Diskrétní PS regulátor a jeho realizace</i>	<i>- 27 -</i>
5	VIZUALIZACE	- 30 -
5.1	VIZUALIZAČNÍ PROGRAM PROMOTIC [17]	- 30 -
5.1.1	<i>Editor aplikace</i>	<i>- 30 -</i>
5.1.2	<i>Editor obrazů</i>	<i>- 31 -</i>
5.1.3	<i>Promotic a Internet</i>	<i>- 31 -</i>
5.1.4	<i>Promotic a otevřenost</i>	<i>- 31 -</i>
5.1.5	<i>Promotic a trendy</i>	<i>- 31 -</i>
5.1.6	<i>Promotic a komunikace</i>	<i>- 32 -</i>
5.2	VIZUALIZAČNÍ APLIKACE MODELU TŘÍ NÁDRŽÍ – JEDNOTLIVÉ BLOKY	- 33 -
5.2.1	<i>OPC server/klient</i>	<i>- 33 -</i>
5.2.2	<i>Trend</i>	<i>- 34 -</i>
5.2.3	<i>Hlavní grafické okno</i>	<i>- 35 -</i>
6	ZÁVĚR	- 37 -
7	POUŽITÁ LITERATURA	- 38 -
8	SEZNAM PŘÍLOH	- 39 -

1 Úvod

Základním smyslem této diplomové práce je vytvoření regulačního obvodu pro regulaci výšky hladiny v soustavě tří nádrží zapojených sériově za sebou, kdy odtok jedné nádrže je připojen k druhé nádrži, kde slouží jako přítok. Odtok třetí nádrže je stále otevřen. Pro systém byly vytvořeny dva typy regulátorů pro srovnání.

Jelikož systém je nelineární, je třeba jej linearizovat v daném pracovním bodě. Tomu je věnována první část této práce.

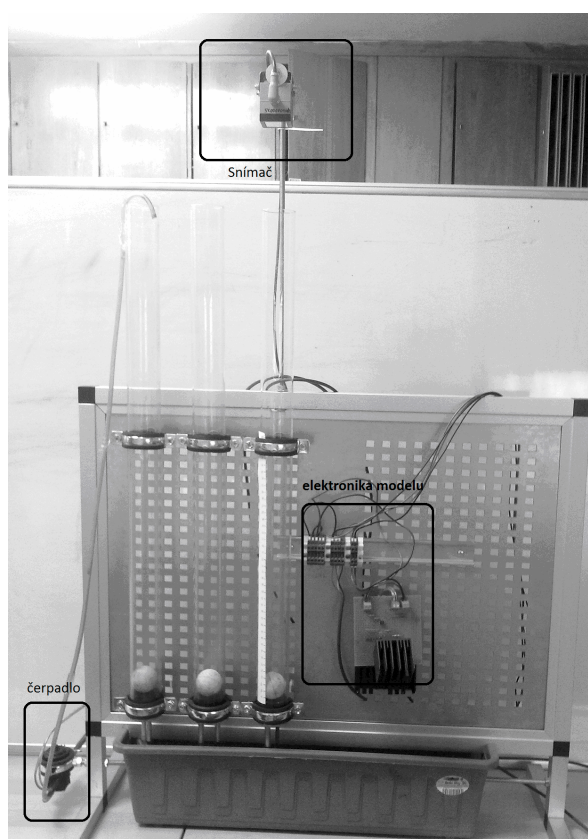
V další části se práce zabývá návrhem a realizací PI (PS) regulátoru pro daný systém. Ke všem výpočtům a simulacím bylo využito programu Matlab a Matlab/Simulink. Dále byl navržen a realizován prediktivní MPC regulátor. Výsledky obou regulátorů byly porovnány a zhodnoceny.

Prediktivní regulátor spadá do kategorie stavových regulátorů. To znamená, že je třeba znát přesné stavy regulované soustavy nebo jeho přesný matematický popis (model). Hlavní výhodou prediktivního řízení oproti klasickému PID nebo PSD je výpočet optimálního akčního zásahu pomocí odhadnutí budoucí hodnoty výstupu regulované soustavy. Pokud není možné jednotlivé stavy regulované soustavy měřit, využívá regulátor Luenbergerova pozorovatele (Luenberger observer). Ovšem je samozřejmé, že prediktivní řízení má i nevýhody. Hlavní nevýhodou je vyšší výpočetní výkon, což v dnešní době už přestává být problémem, protože řídicí jednotky (počítače, PLC atd.) jsou již dostatečně rychlé i na velmi složité výpočty.

Na závěr práce je pro danou soustavu vytvořena vizualizace.

2 Soustava tří nádrží

Soustava obsahuje tři nádrže T1, T2 a T3, které jsou navzájem (sériově) propojeny, přičemž výška nádrží je 80cm. Voda se napouští do první nádrže pomocí čerpadla Č1. Z nádrže T1 se tedy automaticky přelévá voda do nádrže T2, z té pak do nádrže T3, ze které voda neustále odtéká zpět do nádoby na vodu. Výšku hladiny ve 3. nádrži je třeba regulovat do 40cm. Senzor, měřící výšku hladiny, je upevněn nad nádrží T3 a připojen k programovatelnému automatu WinPAC-8841 na modul I-8017HW na jeho poslední vstup (A/D převodník), jedná se o laserový snímač IFM electronic OID102. K ovládání čerpadla Č1 se využívá PWM signál o frekvenci 1000Hz, který je na výstupu modulu I-8088W (PWM) programovatelného automatu WinPAC-8841. Podrobnější popis je uveden v následujících kapitolách.



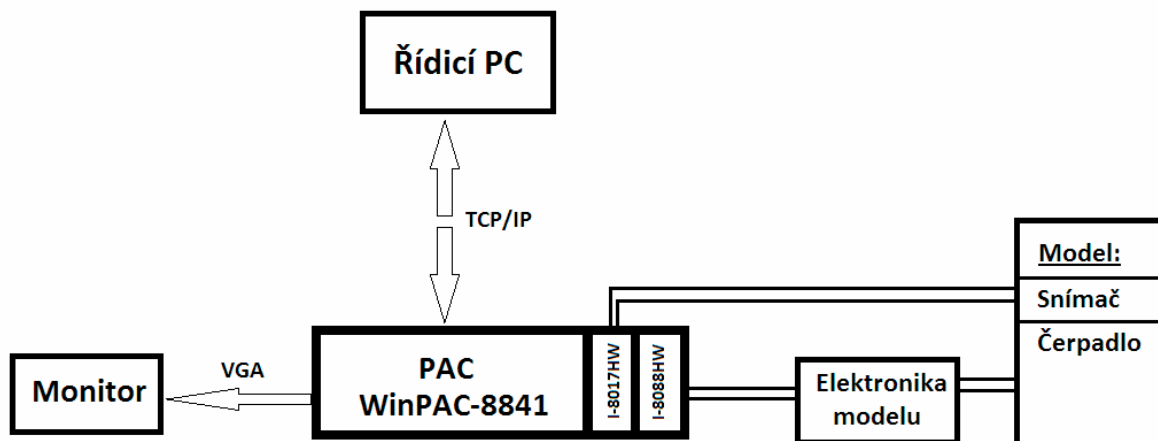
Obr. 2.1: Reálná soustava tří nádrží

Parametry modelu tří nádrží:

- | | |
|--|---|
| - $d = 0.0425\text{m} = 4,25\text{cm}$ | - průměr všech nádrží |
| - $S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = 0,001419\text{m}^2$ | - plocha hladiny všech nádrží |
| - $d_v = 0,0028\text{m} = 2,8\text{mm}$ | - průměr odtoku 1. a 2. nádrže a přítoku 2. a 3. nádrže |
| - $S_v = 0,00000616\text{m}^2 = 6,16\text{mm}^2$ | - společná plocha propojující 1. a 2. nádrž a 2. a 3. nádrž |
| - $d_{v3} = 0,002\text{m} = 2\text{mm}$ | - průměr odtoku 3. nádrže |
| - $S_{v3} = 0,00000314\text{m}^2 = 3,14\text{mm}^2$ | - plocha odtoku z 3. nádrže |

2.1 Realizace reálné soustavy

Zapojení PAC s modelem tří nádrží a řídicím PC. Úkolem bylo vytvořit elektronický obvod, který upravuje výstupní PWM signál z programovatelného automatu do čerpadla. Dále vytvořit spojení mezi programovatelným automatem a modelem tří nádrží. A spojení mezi programovatelným automatem a řídicím počítačem, kde je možno model ovládat pomocí vizualizačního prostředí. Celkové zapojení je na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Celkové zapojení modelu tří nádrží

2.1.1 Elektronika modelu pro čerpadlo

K napouštění vody do nádrží slouží zubové čerpadlo APO 40.01 (výrobce SEV Litovel, s.r.o.), jedná se o čerpadlo pro stejnosměrné napětí 12V a odběrem až 3A. Čerpadlo je zobrazeno na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Čerpadlo zubové APO 40.01 [14]

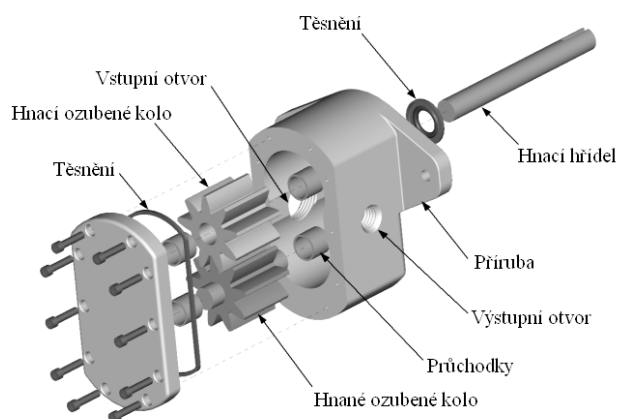
Zubové čerpadlo používá k čerpání kapaliny dvou ozubených kol. Jedná se o jedno z nejběžnějších typů čerpadel používaných v hydraulických systémech. Princip zubového čerpadla je založen na tom, že zuby dvojice ozubených kol mohou unášet čerpanou látku, a zároveň těsnit, pokud do sebe zapadnou. [9]

Funkce ozubeného čerpadla [9]:

1. Rotace ozubených kol způsobí podtlak na vstupní straně čerpadla, čímž dojde k nasátí kapaliny do skříně čerpadla.
2. Kapalina je dále unášena prostorem mezi ozubenými koly a skříní čerpadla – kapalina neproudí místem styku ozubených kol.
3. Nakonec je kapalina vytlačena skrze výstupní otvor.

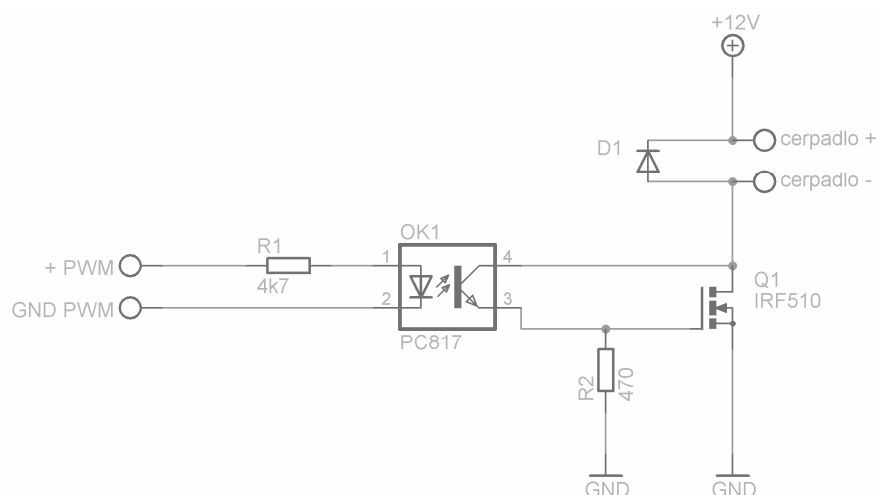


Obr. 2.4: Funkce ozubeného čerpadla [9]



Obr. 2.5: Zubové čerpadlo [9]

Pro řízení čerpadla byla vytvořeno elektronické zapojení, které je zobrazeno na obr. 2.6. Jako vstup slouží PWM signál přivedený z programovatelného automatu z modulu I-8088W. Signál je o frekvenci 1kHz. Při regulaci se mění střída v rozmezí 0 až 50%. Vstup je galvanicky oddělen pomocí optočlenu PC817. Napájení čerpadla je provedeno stejnosměrným zdrojem o velikosti napětí 12V. Napětí na čerpadlu se spíná pomocí výkonového tranzistoru IRF510, kdy na jeho vstup je přiveden PWM signál z již zmíněného modulu I-8088W. Dioda slouží jako ochrana proti přepólování. Zapojení je realizováno na univerzální (zkušební) desce plošného spoje. K tranzistoru IRF510 je připevněn malý chladič, aby nedocházelo k jeho přehřátí.

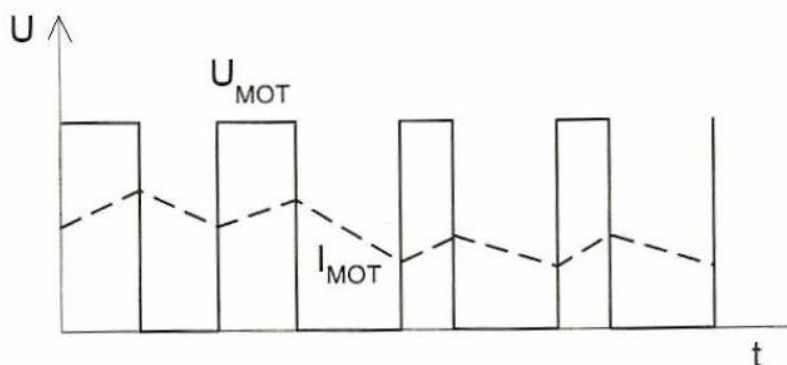


Obr. 2.6: Schéma zapojení elektronické části řízení čerpadla

2.1.2 Řízení pomocí PWM signálu

Pro řízení otáček máme 2 alternativy, lineární nebo pulzní regulaci. Každá varianta má různou účinnost, efektivnost a kvalitu. Při lineární regulaci je snižováno napětí (omezován proud), kterým je motorek napájen. Navíc při nízkých otáčkách dochází k trhavému chodu motorku, rozdílový výkon se ztrácí na výkonovém prvku obvodu (regulátoru). Proto je třeba výkonový prvek náležitě chladit (u malých motorků dosahuje ztrátový výkon jednotky, u větších motorků desítky wattů). Tento fakt zvětšuje regulátor (velké pasivní chladiče), nastává teplotní namáhání součástek v celém obvodu, zvyšuje se energetická náročnost a náklady na provoz (zbytečně protopený výkon). Lineární regulaci provází další negativní jev projevující se při velmi nízkých otáčkách (malém napětí), při kterém se motorky neroztočí plynule.

Pulzní regulátory otáček jsou využívány zejména pro řízení stejnosměrných motorků. Princip spočívá v napájení motorku jmenovitým napájecím napětím, které je však připojováno v impulzech po definovaný časový úsek, který je střídán nulovým napájecím napětím. Délka napájecího pulzu potom určuje rychlost otáčení motorku, přičemž se střída může pohybovat od 0 do 100%. Výhodou pulzního řízení oproti lineárnímu je snížení výkonové ztráty regulátoru na minimum a zachování kroutícího (točivého) momentu motorku, což umožňuje provozovat motorek od velmi nízkých otáček. Motor se chová jako kdyby byl napájen napětím o velikosti střední (průměrné) hodnoty, která je dána poměrem doby zapnutí a vypnutí. [12]



Obr. 2.7: Průběh proudu motorem (čerpadla) při PWM [13]

2.1.3 Snímač hladiny

Ke snímání výšky hladiny byl použit optický distanční snímač O1D102 od firmy IFM electronic. Jeho parametry jsou zobrazeny v tabulce Tab. 2.1. Snímač je napájen stejnosměrným napětím o velikosti 24V. Výstupem je napětí úměrné vzdálenosti objektu od snímače (výška hladiny třetí nádrže).

Elektrické provedení	DC PNP	
	OUT1: spínač / rozpínač programovatelný OUT2: spínač / rozpínač programovatelný nebo analogový (4...20 mA / 0...10 V, škálovatelný)	
Průměr světelné skvrny [mm]	6 (Snímací vzdálenost 3,5 m)	
měřicí frekvence [Hz]	1...50	
Provozní napětí [V]	18...30 DC	
Proudový odběr [mA]	< 150	
Proudová zatížitelnost [mA]	2 x 200	
Ochrana proti zkratu	Taktovaný	
Odolné proti přepólování	ano	
Odolné proti přetížení	ano	
Typ životnosti [h]	50000	
Displej	Spínací stav	2 x LED žlutá
	Provoz	LED zelená
	vzdálenost, programování	4-poziční alfanumerický display
Okolní teplota [°C]	-10...60	
Skladovací teplota [°C]	-30...80	
Krytí, tř.krytí	IP 67, III	
Materiál pouzdra	pouzdro: Litý zinek; čelní okénko: sklo; LED-okénko: Polykarbonát	
Analogový výstup	4...20 podle IEC 61131-2	
Proudový výstup [mA]	250	
maximální zátěž [Ω]	0...10 podle IEC 61131-2	
Napěťový výstup [V]	5000	
min. zátěž [Ω]		
El.mag.kompatibilita	EN 60947-5-2	
MTTF [letá]	192	
Připojení	M12 konekt. připojení	
Hmotnost [kg]	0,271	

Tab. 2.1: Parametry snímače výšky hladiny [15]



Obr. 2.8: Snímač O1D102 [15]

2.2 Odvození matematického modelu

Vychází se z kaskádního propojení tří nádrží, kde každá z nádob lze popsat následující diferenciální rovnicí.

$$S \cdot \frac{dh(t)}{dt} = Q(t) - S_v \cdot v(t) \quad (2.1)$$

Kde S je příčná plocha hladiny nádoby [m^2]

S_v je plocha výtoku z nádoby [m^2]

$Q(t)$ je přítok do nádoby [m^3/s]

$v(t)$ je výtoková rychlost z nádoby [m/s]

$h(t)$ je hladina kapaliny v nádobě [m]

Výtokovou rychlost z nádoby popisuje Torriceliho vzorec

$$v(t) = \sqrt{2 \cdot g \cdot h(t)} \quad (2.2)$$

Při kaskádním propojení více nádob se vztah (2.2) přepíše s ohledem na výšku hladiny kapaliny v sousední nádobě (2.3).

$$v_{12}(t) = \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1(t) - h_2(t)|} \quad (2.3)$$

Znaménková funkce signum zajišťuje, že při záporném rozdílu hladin h_1 a h_2 se změní i směr rychlosti. Absolutní hodnota rozdílu hladin pod odmocninou zamezuje překročení definičního oboru odmocniny.

Soustavu tří nádrží popisuje soustava tří nelineárních diferenciálních rovnic (2.4).

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{Q(t)}{S_1} - \frac{S_{v12}}{S_1} \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1(t) - h_2(t)|} \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{S_{v12}}{S_2} \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1(t) - h_2(t)|} - \frac{S_{v23}}{S_2} \cdot \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_2(t) - h_3(t)|} \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{S_{v23}}{S_2} \cdot \text{sign}(h_2(t) - h_3(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_2(t) - h_3(t)|} - \frac{S_{v3}}{S_3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3(t)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Jelikož počáteční hladiny v jednotlivých nádobách mají sestupnou tendenci, čili směr rychlosti toku kapaliny bude vždy od první k poslední, Tomu nasvědčuje i to, že kapalina vtéká do první nádoby a vytéká z poslední nádoby. Rovnice (2.4) se proto zjednoduší na tvar (2.5).

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{Q(t)}{S_1} - \frac{S_{v12}}{S_1} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1(t) - h_2(t))} \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{S_{v12}}{S_2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1(t) - h_2(t))} - \frac{S_{v23}}{S_2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_2(t) - h_3(t))} \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{S_{v23}}{S_3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_2(t) - h_3(t))} - \frac{S_{v33}}{S_3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3(t)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Soustavu rovnic (2.5) je třeba linearizovat v pracovním bodě. Linearizace pomocí Taylorova rozvoje v daném pracovním bodě (2.6).

$$\begin{aligned}h_{10} &= 0,51m \\h_{20} &= 0,43m \\h_{30} &= 0,35m \\Q_0 &= 0.00000823 \frac{m^3}{s}\end{aligned}\tag{2.6}$$

Soustava diferenciálních rovnic po výpočtu Taylorova rozvoje

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{Q - Q_0}{S_1} - \frac{S_{v12} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_1 \sqrt{h_{10} - h_{20}}} \cdot (h_1 - h_{10}) + \frac{S_{v12} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_1 \sqrt{h_{10} - h_{20}}} \cdot (h_2 - h_{20}) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{S_{v12} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_1 \sqrt{h_{10} - h_{20}}} \cdot (h_1 - h_{10}) - \left(\frac{S_{v12} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_2 \sqrt{h_{10} - h_{20}}} + \frac{S_{v23} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_2 \sqrt{h_{20} - h_{30}}} \right) \cdot (h_2 - h_{20}) + \frac{S_{v23} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_2 \sqrt{h_{20} - h_{30}}} \cdot (h_3 - h_{30}) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{S_{v23} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_3 \sqrt{h_{20} - h_{30}}} \cdot (h_2 - h_{20}) - \left(\frac{S_{v23} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_3 \sqrt{h_{20} - h_{30}}} + \frac{S_{v3} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot S_3 \sqrt{h_{30}}} \right) \cdot (h_3 - h_{30})\end{aligned}\tag{2.7}$$

Po dosažení počátečního stavu a parametrů soustavy se získá linearizovaný model.

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= -0,0340 \cdot \Delta h_1 + 0,0340 \cdot \Delta h_2 + 0 \cdot \Delta h_3 + 704,9 \cdot \Delta Q \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= 0,0340 \cdot \Delta h_1 - 0,0680 \cdot \Delta h_2 + 0,0340 \cdot \Delta h_3 \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= 0 \cdot \Delta h_1 + 0,0340 \cdot \Delta h_2 - 0,0423 \cdot \Delta h_3 \\ y(t) &= \Delta h_3\end{aligned}\tag{2.8}$$

V modelu bude potřeba stále odečítat počáteční hodnoty, zadané vztahem (2.6), protože model soustavy musí pracovat v okolí pracovního bodu (2.9)

$$\begin{aligned}\Delta h_1 &= h_1 - 0,51 \\ \Delta h_2 &= h_2 - 0,43 \\ \Delta h_3 &= h_3 - 0,35 \\ \Delta Q &= Q - 0,00000823\end{aligned}\tag{2.9}$$

Výstup soustavy poté bude (2.10)

$$\Delta h_3 = h_3 - 0,35 \Rightarrow h_3 = \Delta h_3 + 0,35 = y\tag{2.10}$$

Stavový popis soustavy tří nádob (2.11)

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0,034 & 0,034 & 0 \\ 0,034 & -0,68 & 0,034 \\ 0 & 0,034 & 0,0423 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 704,9 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta Q \\ y &= [0 \quad 0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} + [0] \cdot \Delta Q\end{aligned}\tag{2.11}$$

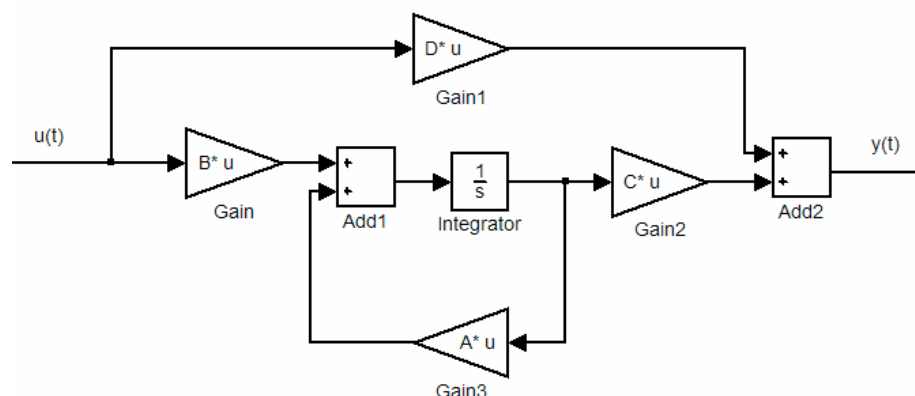
Na následujícím obrázku je zobrazeno rozkreslení linearizované soustavy v programu Matlab/Simulink. Soustavu bylo třeba rozkreslit pouze pomocí základních matematických prvků, jako jsou integrátor, zesilovač, sčítací a odčítací členy, protože program RexDraw neumí pracovat s maticemi. Pro rozkreslení se vycházelo ze stavového popisu soustavy (2.12), přičemž pro dané matice platí hodnoty v rovnici (2.13). S tímto modelem se bude dále pracovat v následujících kapitolách.

Obeční stavový popis systému.

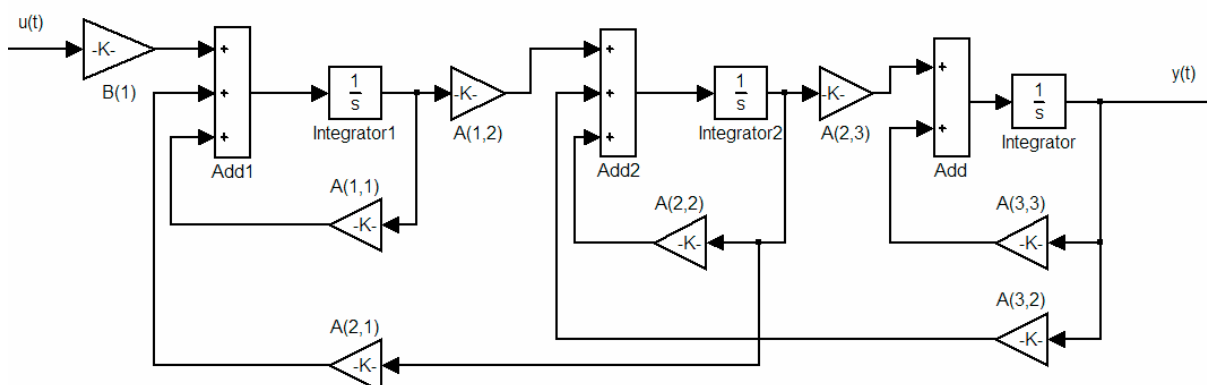
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Matice stavového popisu modelu tří nádrží.

$$A = \begin{bmatrix} -0.034 & 0.034 & 0 \\ 0.034 & -0.68 & 0.034 \\ 0 & 0.034 & 0.0423 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 704,9 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = 0 \quad (2.13)$$



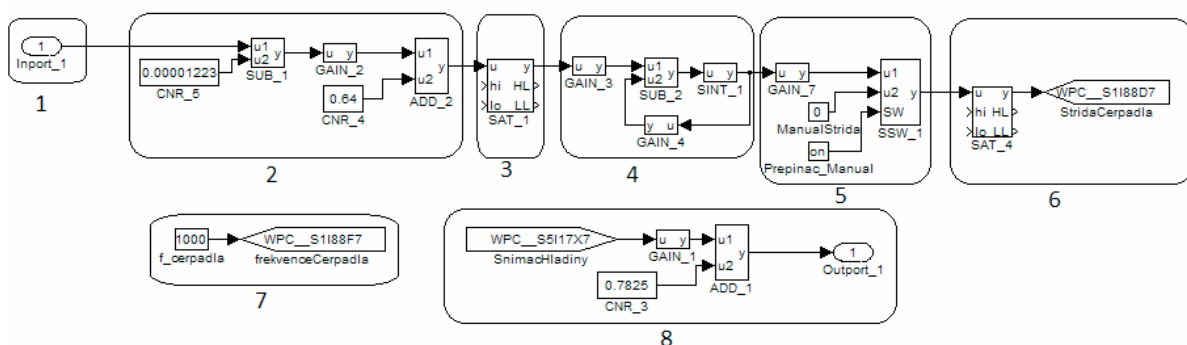
Obr. 2.9: Soustava rozkreslená pomocí matic



Obr. 2.10: Rozkreslená soustava

2.3 Řízení reálné soustavy

Po linearizaci systému bylo vytvořeno základní řízení soustavy, zatím bez regulátoru, pouze k manuálnímu řízení. Výhoda tohoto řízení je, že na vstup se může připojit regulátor, kde jako akční zásah je hodnota *přítok* s jednotkou m^3/s a dále použit ke zpětnovazebnímu řízení. Výsledek je zobrazen na obr. 2.11. Jednotlivé části jsou popsány dále.



Obr. 2.11: Řízení reálné soustavy v programu Rex

Jako vstup slouží Inport_1 (1), který bude dále sloužit jako vstup akčního zásahu z regulátoru. Hned za vstupem je člen (2) pro přepočítání akčního zásahu regulátoru, čili přítoku (m^3/s), na střídu podle vzorce 2.14.

$$D = 52330 \cdot (Q - 0,00001223) + 0,64 \quad (2.14)$$

Při vypnutí čerpadla (střída $D = 0$) dojde k odtoku vody z napouštěcí hadičky, proto aby nedocházelo k dopravnímu zpoždění při řízení soustavy, je dále zapojen saturační člen (3), který má nastaveny hodnoty:

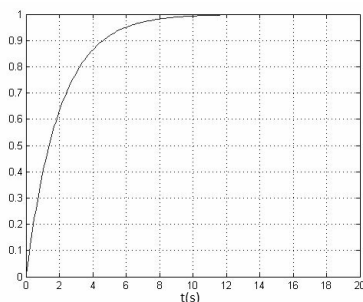
Horní limit = 1 - Střída 100%

Dolní limit = 0,16 - Střída 16%

Ten udrží hladinu vody v napouštěcí hadičce v horní úrovni.

Při zpětnovazebním řízení dochází k velkým skokům změny akční veličiny. Aby nedocházelo ke skokovým změnám střídy, je uveden další člen (4), který má přechodovou charakteristiku na obr. 2.12. Jedná se o přenos podle rovnice 2.15.

$$G = \frac{1}{2s + 1} \quad (2.15)$$



Obr. 2.12: Přechodová charakteristika přenosu (2.15)

Následuje člen (5), kterým je možno přepínat mezi dvěmi větvemi, kde první větev slouží ke zpětnovazebnímu řízení, přičemž na vstup je ještě připojen zesilovač s hodnotou zesílení 100. Je třeba přepočítat střidu, která je uvedena v rozmezí 0-1 na hodnotu procentuální 0-100%. Druhá větev slouží k přímému nastavení střidy v procentech 0-100.

Nakonec je zapojen člen (6), který zapíše hodnotu střidy na modul I-8088W patřičného výstupu. Saturační člen je zapojen, aby nedošlo ke zničení čerpadla, které není určeno k dlouhodobému používání na plný výkon. Hodnoty saturačního členu jsou:

Horní limit = 40 - Střída 40%

Dolní limit = 0 - Střída 0%

Člen (7) slouží k zapsání frekvence o velikosti 1kHz na patřičný výstup modulu I-8088W.

Poslední člen (8) získává hodnotu napětí ze snímače, který snímá hladinu ve třetí nádrži, a přepočítává jej na výšku hladiny v jednotkách m , podle rovnice 2.16, kde hodnota U udává hodnotu napětí ze snímače výšky hladiny.

$$h = 0,7825 - 0.34037 \cdot U \quad (2.16)$$

2.4 Řídicí aplikace v programovatelném automatu WinPAC

Pro ovládání programovatelného automatu WinPAC byl použit řídicí systém REX. O něm je podrobněji psáno v kapitole 3. Tato část se zabývá nahráním již vytvořené řídicí aplikace do programovatelného automatu a komunikací mezi PAC a řídicím PC.

V programu RexDraw, ve kterém byl navržen řídicí model, je třeba vytvořit další model, který se nastaví jako hlavní. Jak je zobrazeno na obr. 2.13. Model obsahuje blok *EXEC*.

Blok *EXEC* tvoří základ tzv. hlavního souboru projektu ve formátu .mdl, kterým se konfiguruje jednotlivé subsystemy řídicího systému REX, a který nemá analogii v systému Matlab-Simulink. Konfigurace bloku *EXEC* a na něj navázané bloky nerealizují žádný výpočetní algoritmus, ale jsou zpracovány překladačem RexComp pro sestavení celé aplikace řídicího systému REX. [6]

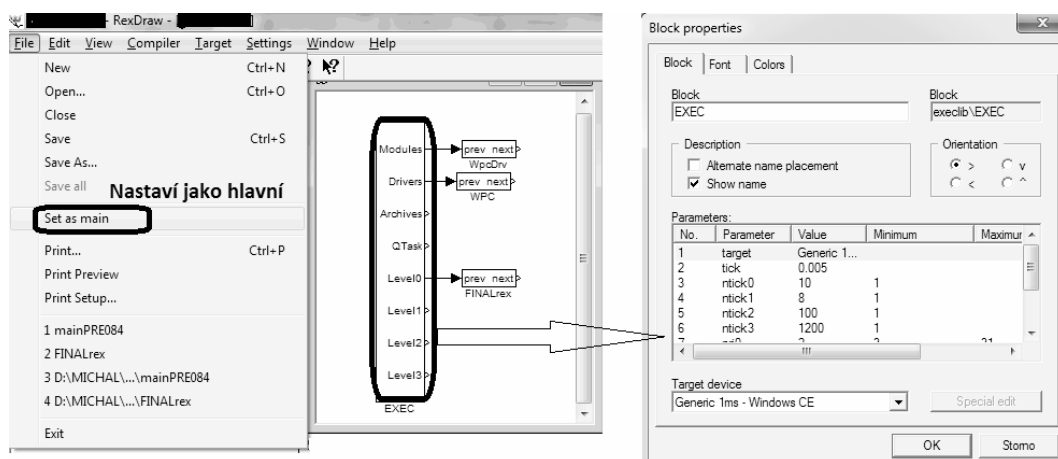
Na výstup Modules je připojen Modul WpcDrv.

Na výstup Drivers je připojen Driver WPC. Jeho parametry jsou nastaveny:

Classname = WpcDrv

Cfgname = WpcDrv.rio (jedná se o driver, který musí být ve stejné složce jako hlavní program)

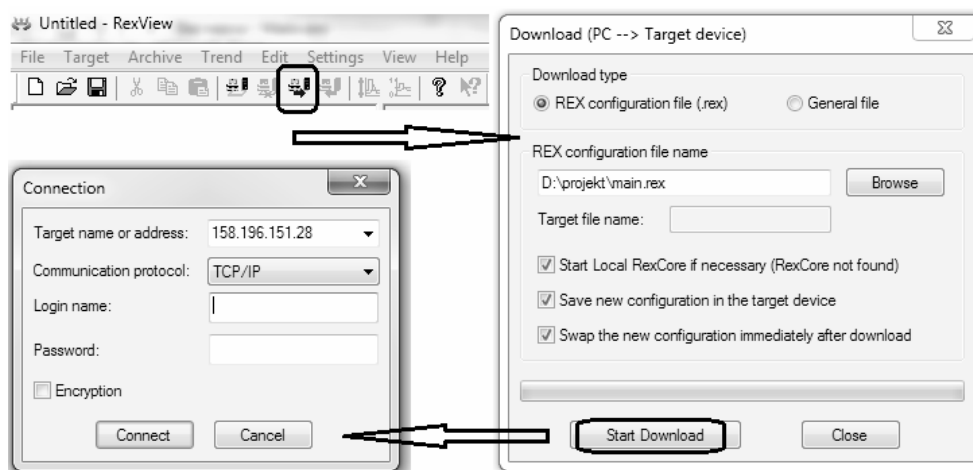
Na výstup Level0 je připojen Task s řídicí aplikací.



Obr. 2.13: Nastavení hlavního modelu v programu RexDraw a bloku EXEC

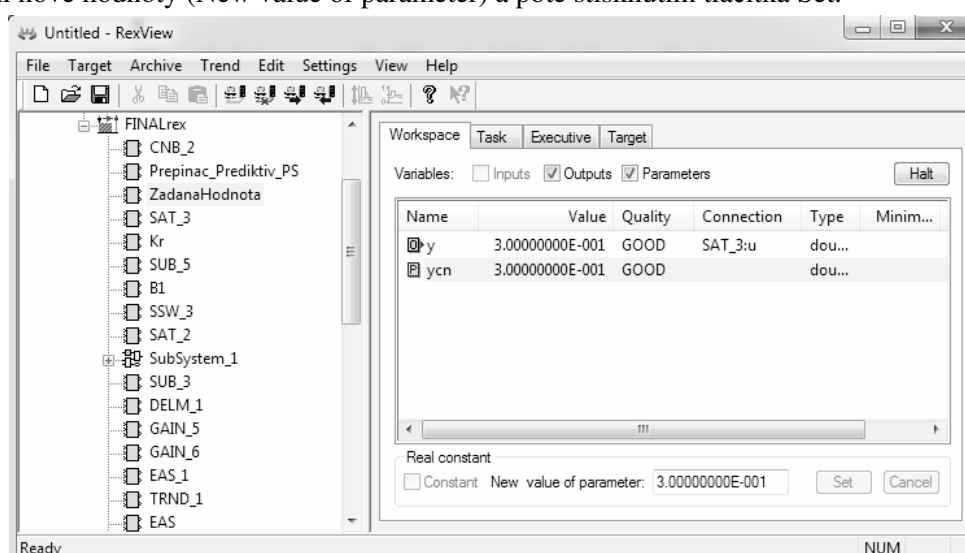
Poté co byly oba modely spojeny (hlavní a řídicí), vytvořený program se zkompile. Po zkompileování se vytvoří ve složce, kde je program uložen, soubor pod stejným názvem jako je hlavní program s příponou .rex. Tento soubor se nahraje do PAC. K tomu slouží program RexView.

Podrobný popis nahrání zkompileovaného souboru pomocí RexView je na obr. 2.14. Po kliknutí na ikonu Download se zobrazí okno Download (PC --> Target device), do REX configuration file name se vloží adresa zkompileovaného souboru. Po kliknutí na Start Download se zobrazí další okno Connection, kde se vybere komunikační protokol TCP/IP a zadá IP adresa daného PAC. V tomto případě se jedná o IP adresu: 158.196.151.28. Po kliknutí na Connect se program nahraje do PAC.



Obr. 2.14: Nahrání programu do WinPAC pomocí RexView

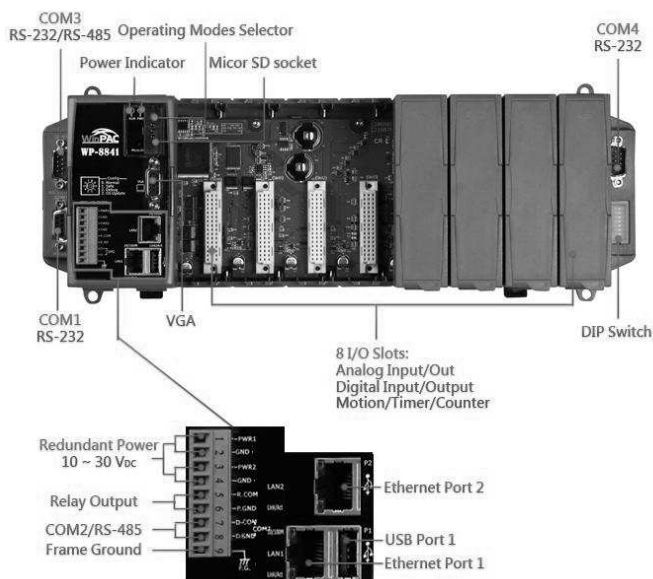
Hlavní funkcí programu RexView, že dokáže sledovat hodnoty všech proměnných v PAC a také je měnit. Proto po nahrání programu do PAC se vytvoří seznam všech stavů ve WinPAC, zobrazeno na obr. 2.15. Jako příklad je vybrána konstanta *ZadanaHodnota*, ta lze změnit pomocí okna pro zadání nové hodnoty (New value of parameter) a poté stisknutím tlačítka Set.



Obr. 2.15: Vnitřní stavy WinPAC zobrazené v RexView

3 Programovatelný automat WinPAC-8000

Soustava tří nádrží je řízena programovatelným automatem WinPAC-8000, uvedeným na obrázku (Obr. 3.1). Jedná se o programovatelný automat PAC od firmy ICP DAS. WinPAC-8000, v případě řízení tří nádrží je použit typ WinPAC-8841, rozdíl mezi ostatními programovatelnými automaty z řady 8000 je, že má možnost zapojení až 8 modulů. Jednou z možností programování automatu je řídicí systému Rex.



Obr. 3.1: Programovatelný automat WinPAC-8841 [8]

3.1 Parametry

System software

Operační systém – WinCE.NET 5.0

Vestavěné služby – FTP server, Web server (VB script, JAVA script), Embedded SQL server

CPU modul

CPU – PXA 270 nebo kompatibilní (32-bitový 520MHz)

SDRAM – 128MB

Real Time Clock

EEPROM – 16kB

Dual Watchdog Timer – 1 pro OS a druhý pro aplikaci

VGA a komunikační porty

VGA – vstup pro monitor (rozlišení 640x480, 800x600)

Ethernet port – 2x RJ-45

USB 1.1

Sériový port COM

I/O sloty

8x slot pro moduly Plug&Play

Velikost a pracovní teplota

354x132x111 mm

-25 °C ~ +75 °C

Při řízení soustavy tří nádrží se využívá pouze jednoho vstupu modulu I-8017HW, což je šestnácti kanálový vstupní modul analogového signálu, a jednoho výstupu modulu I-8088W, což je šestnácti kanálový vstupně/výstupní modul PWM signálu.

3.2 Modul I-8017HW

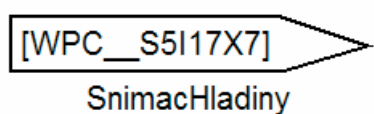
Jedná se o analogový V/V modul. Modul obsahuje 8 diferenciálních nebo 16 single-ended kanálů analogových vstupů. Každý kanál může pracovat v jednom z následujících pěti režimů, kterým odpovídají určité typy vlajek.

1. ± 10 V vlajka typu X (extra large)
2. ± 5 V vlajka typu L (large)
3. ± 2.5 V vlajka typu M (medium)
4. ± 1.25 V vlajka typu S (small)
5. ± 20 mA vlajka typu C (current)



Obr. 3.2: Modul I-8017HW [8]

V tomto případě modul je na 5 slotu automatu (S5), jedná se o modul I-8017 (I17) a využívám poslední osmý vstup pro napětí ± 10 V (X7). Proto zápis vypadá následovně - WPC__S5I17X7. Vlajka je zobrazena na obrázku.



Obr. 3.3: Vlajka vstupu analogového modulu pro snímač hladiny

Parametry modulu I-8017HW

Rozlišení A/D převodníku – 14bit

Vzorkovací frekvence – 100/50/16K S/S (Single channel Polling/Interrupt /Scan mode)

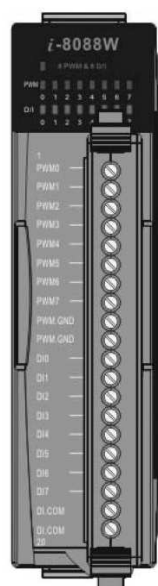
Přesnost – $\pm 0,1\%$

Vstupní impedance – 20k, 200k, 20M Ω

Maximální příkon – 2W

3.3 Modul I-8088W

Jedná se o 16ti kanálový modul, kde 8 kanálů slouží jako výstup PWM signálu a 8 kanálů slouží jako digitální vstup. Modul a jeho rozmístění kanálů je zobrazeno na obr. 3.4.

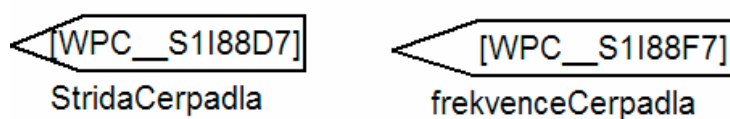


Terminal No.	Pin Assignment
01	PWM0
02	PWM1
03	PWM2
04	PWM3
05	PWM4
06	PWM5
07	PWM6
08	PWM7
09	PWM.GND
10	PWM.GND
11	DI0
12	DI1
13	DI2
14	DI3
15	DI4
16	DI5
17	DI6
18	DI7
19	DI.COM
20	DI.COM

Obr. 3.4: Modul i-8088W a jeho rozmístění kanálů [8]

Zapsání vlajek:

Bylo třeba zvlášť nastavit vlajku pro frekvenci PWM signálu a pro jeho střidu. Proto bylo třeba nastavit 2 vlajky. Pro frekvenci PWM signálu vlajka vypadá takto – WPC__S1I88F7, modul je na prvním slotu (S1), modul je I-8088 (I88) a bylo třeba nastavit frekvenci, přičemž se využívá posledního osmého kanálu (F7), jak je zobrazeno na obrázku. Frekvence se nastaví na 1kHz pomocí konstanty. Pro střidu je vlajka skoro stejná, jen místo F (frequency) je písmeno D (duty - střída), tzn. WPC__S1I88D7, jak je zobrazeno na obrázku. Při řízení soustavy se pracuje se změnou střídý, střída se nastavuje přímo v procentech v rozmezí 0~100 (%).



Obr. 3.5: Vlajky pro střidu a frekvenci PWM signálu

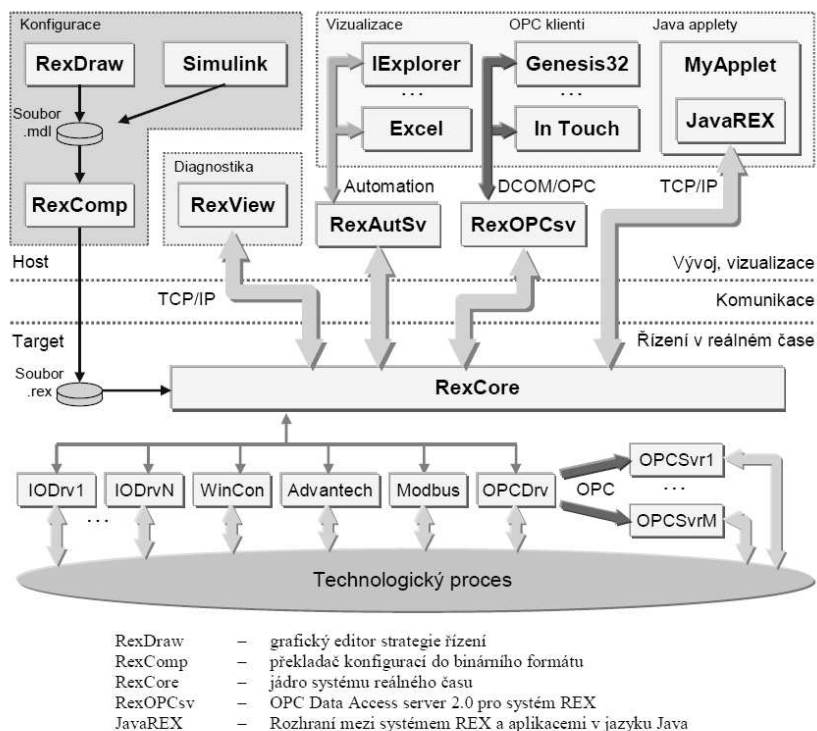
3.4 Řídicí systém Rex

Kompatibilita s globálně rozšířeným simulačním systémem Simulink je hlavní ideou řídicího systému REX. Tím uživatel získává všechny jeho výhody pro návrh vyspělých algoritmů řízení. Pro plnohodnotné využití systému REX však licence systému Matlab-Simulink není nutná. Další důležitou vlastností je implementace standardního rozhraní OPC, umožňujícího napojení na všechny významné systémy pro vizualizaci a operátorské ovládání řízených procesů (SCADA a HMI). [1]

Podporované platformy:

- Počítače PC a IPC (průmyslová PC) a embedded PC s OS Windows 2000/XP, Phar Lap ETS a Windows CE.NET.
- Ovladače: PC+PLC WinCon 8000, USB moduly National Instruments, zásuvné karty Advantech a Tedia, zařízení s komunikací Modbus RTU a TCP/IP, OPC servery DA 2.x, a další.

Struktura řídicího systému REX je zřejmá z následujícího obrázku:



Obr. 3.6: Struktura řídicího systému Rex [1]

V horní části obrázku jsou obsaženy komponenty vývojového prostředí (Host), které je současně i prostředím pro vizualizaci a operátorské ovládání řídicího systému. Všechny současné vývojové nástroje systému REX jsou určeny pro operační systémy Windows 95/98/ME/NT/2000/XP/7. Pro vizualizaci se používají standardní vizualizační nástroje (některé jsou přímo uvedeny v obrázku). Vizualizační nástroje jsou napojeny na řídicí systém buď přes rozhraní OPC, využívající služby COM (Component Object Model) a DCOM (Distributed COM), nebo přes Automation (OLE Automation) a skripty (VBScript, JScript, Visual Basic).

Spodní část obrázku naznačuje strukturu cílového prostředí (Target), které realizuje vlastní řízení v reálném čase. Cílovým prostředím mohou být (stejně jako u vývojového prostředí) operační systémy Windows 95/98/ME/NT/2000/XP/7, ale i např. Windows CE, VxWorks nebo Real Time Linux. V případě operačních systémů Windows může být cílové prostředí totožné s vývojovým, dokonce na jednom počítači.

Spojovacím článkem mezi prostředími Host a Target je komunikační vrstva. Nejčastěji používaným protokolem pro komunikaci je standard TCP/IP, nad nímž je vybudován vlastní diagnostický protokol systému REX.

Program RexCore, trvale provozovaný na cílové platformě, tvoří jádro řídicího systému REX. Aby bylo možno sledovat činnost řídicího systému na vývojové platformě (zejména v procesu uvádění do provozu), jsou třeba ještě další nástroje. Částečně lze provoz systému sledovat i v již zmíněných vizualizačních nástrojích, detailní pohled však poskytuje program RexView. [1]

3.4.1 RexCore

Jádro řídicího systému RexCore je program provádějící paralelně různé činnosti obvyklé v řídicích systémech. Jednotlivé činnosti jsou vykonávány na základě priorit v režimu preemptivního multitaskingu pomocí jednotlivých subsystémů jádra. Jádro obsahuje tyto subsystémy:

Subsystém reálného času – stará se o spouštění jednotlivých úloh a v nich vložených funkčních bloků, řídí spouštění ovladačů, získává a poskytuje diagnostické informace o časování úloh a ovladačů a vytížení systému.

Vstupně-výstupní subsystém – poskytuje rozhraní pro ovladače technických prostředků pro získávání vstupů z procesu a nastavování výstupů.

Algoritmický subsystém – obsahuje algoritmy funkčních bloků, které jsou volány z úloh subsystému reálného času.

Diagnostický subsystém – poskytuje diagnostické informace o běhu řídicího systému, umožňuje download a ladění aplikací.

Archivační subsystém – slouží pro archivaci událostí, alarmů a historických trendů veličin řídicího systému

3.4.2 RexView

Program RexView umožňuje sledovat, co se děje v jádře řídicího systému REX při jeho běhu, a proto je velmi důležitým nástrojem při uvádění řídicího systému do provozu i v případě vzniku nějakých problémů již během rutinního provozu. Program poskytuje detailní, hierarchicky uspořádané informace o všech subsystémech jádra. Komunikace pomocí protokolu TCP/IP umožňuje připojit se k běžícímu jádru na lokálním počítači, v lokální síti i ve vzdálené síti (např. přes Internet). [1]

3.4.3 RexDraw

Program RexDraw umožňuje navrhovat funkční schémata řídicího systému REX velmi podobným způsobem, jako se konfiguruje ve vestavěném editoru systému Simulink. Oba programy generují soubory s příponou .mdl, v možnostech konfigurace však existují určité rozdíly.

Především editor RexDraw umožňuje vytvářet soubory .mdl složené jen z bloků z rozsáhlé knihovny systému REX. Všechny bloky uvedené knihovny pracují v diskrétním čase, i když jejich

velká část je diskretizována pro danou periodu vzorkování. Tato skutečnost odpovídá nastavení parametrů Solver options v Simulinku na Type: Fixed step a discrete (no continuous states).

Zatímco v systému Simulink je celá konfigurace tvořena jediným souborem, který může obsahovat více subsystémů, v systému REX musí být konfigurace tvořena alespoň dvěma soubory, z nichž právě jeden je tzv. hlavním souborem projektu. [1]

4 Návrh a realizace regulátoru

4.1 Prediktivní regulátor

Prediktivní řízení (model based predictive control – MBPC) je v současné době velmi populární. Ve skutečnosti je to jediný pokročilý způsob řízení, který našel široké uplatnění v řízení průmyslových procesů vedle klasické PID regulace. Hlavní předností prediktivního řízení je jeho jednoduchý obecný princip, který je aplikovatelný stejně dobře pro lineární i nelineární procesy a dále skutečnost, že různé typy omezení na vstupy, stavy a výstupy mohou být explicitně zahrnuty do formulace návrhové úlohy. Na druhé straně je však značná obecnost existujících prediktivních regulátorů překážkou pro jejich širší uplatnění v praxi. Především výpočtová složitost, vedoucí na neúměrné paměťové či časové nároky, zabraňuje implementovat prediktivní algoritmy řízení do kompaktních regulátorů a programovatelných automatů. [2]

4.1.1 Návrh prediktivního regulátoru

Počítá se pro diskrétní model soustavy (4.1)

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Mx(k) + Nu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Hledáme řídicí posloupnost $u(k)$ na horizontu predikce délky T_p minimalizující kritérium (4.2)

$$J = \sum_{k=0}^{T_p-1} \{q(k)[y(k) - \text{ref}(k)]^2 + r(k)[u(k)]^2\} \quad (4.2)$$

kde platí pro $q(k)$ a $r(k)$ jsou váhy regulační odchylky – řídicí veličiny a $w(k)$ je referenční signál. Horizont predikce T_p je doba (do budoucnosti), pro kterou regulátor hledá optimální řídicí posloupnost podle kritéria (4.2).

Predikce výstupu – odezvu systému na horizontu predikce T_p můžeme vyjádřit jako (4.3).

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+T_p-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CM \\ CM^2 \\ \vdots \\ CM^{T_p-1} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} D & & & & \\ CN & D & & & \\ CMN & CN & D & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ CM^{T_p-2}N & \dots & \dots & CN & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+T_p-1) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

V maticové formě

$$y = Vx(k) + Su(k) = \tilde{y} + Su \quad (4.4)$$

Optimální posloupnost řízení u^*

$$u^* = -Fx(k) + Gw(k) \quad (4.5)$$

Pro matice F a G platí vztah:

$$\begin{aligned} F &= (S^T Q S + R)^{-1} S^T Q V \\ G &= (S^T Q S + R)^{-1} S^T Q \end{aligned} \quad (4.6)$$

Z rovnice (4.5) lze vidět, že řídicí posloupnost na horizontu predikce T_p je závislá pouze na počáteční podmínce $x(k)$ a na budoucí posloupnosti žádané hodnoty w_k . To znamená, že řídicí veličina $u(k)$ v čase k závisí pouze na stavu $x(k)$ a na žádané hodnotě $w(k)$. Protože pro klouzavý horizont potřebujeme vypočítat pouze první hodnotu z vektoru $u^*(k)$, můžeme vyjádřit prediktivní regulátor ve tvaru (4.7)

$$u^*(k) = -K_x x(k) + K_r r(k) \quad (4.7)$$

Zde platí pro zesílení K_x a K_r následující vztah.

$$K_x = f_1 \quad K_r = \sum_{j=0}^{T_p-1} g_{1,j} \quad (4.8)$$

Kde f_1 je první řádek matice F a $g_{1,j}$ jsou prvky prvního řádku matice G.

Výpočty jsou provedeny v programu Matlab pomocí následujícího algoritmu.

```
Ts = 100;
[Ad,Bd,Cd,Dd] = C2DM(A,B,C,D,Ts,'zoh');

%----- Doba predikce a matice Q,R
Tp = 100;
Q = 100*eye(Tp);
R = 1*eye(Tp);

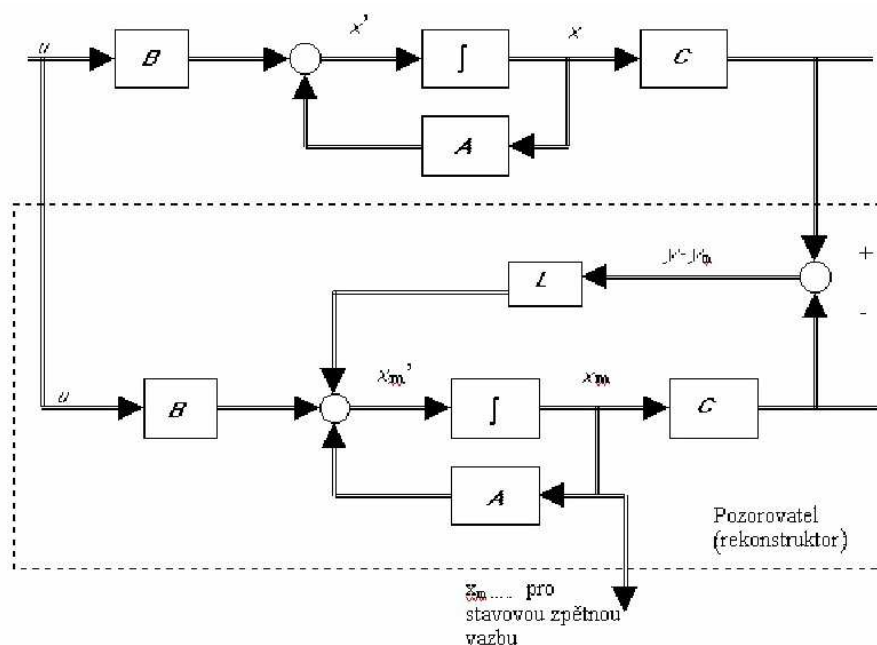
%----- Matice y~ /x0 pro predikci
V = [];
for i = 0 : 1 : Tp-1
V = [V;Cd*Ad^i];
end
%----- Matice S pro predikci
S = Dd*eye(Tp);
for i = 1 : Tp
for j = 1 : i-1
S(i,j) = Cd*Ad^(i-j-1)*Bd;
end
end
%----- Matice analytického MPC regulatoru
G = inv(S'*Q*S+R)*S'*Q;
F = G*V;
Kx = F(1,:);
Kr = sum(G(1,:));
```

Pro model tří nádrží zesílení prediktivního regulátoru vyšla:

$$K_x = [0,00001954 \quad 0,0000191 \quad 0,0000171]$$

$$K_r = 0,0000817$$

Protože stavy nejsou přímo měřeny, bylo třeba vytvořit ještě k prediktivnímu regulátoru identický pozorovatel stavů – Luenbergerův pozorovatel, také rekonstruktor, či estimátor. Ten dokáže vypočítat stavové veličiny. Jedná se o dynamický subsystém řídicího systému, jímž se provádí výpočet těch stavových veličin, které není možné měřit.



Obr.4.1: Luenbergerův pozorovatel

Objekt i model by měl mít stejnou strukturu i parametry. Ve skutečnosti mezi stavem objektu a modelu vznikne vždy odchylka. Výstup regulovaných veličin Y , který je měřitelný lze využít ke zmenšení této odchylky pomocí zpětné vazby přes matici L . Stavové rovnice s pozorovatelem je následující:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) + L(y - y_m) \\ y(k) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Odchylka stavů systému a modelu je:

$$e(t) = x(t) - x_m(t) \quad (4.10)$$

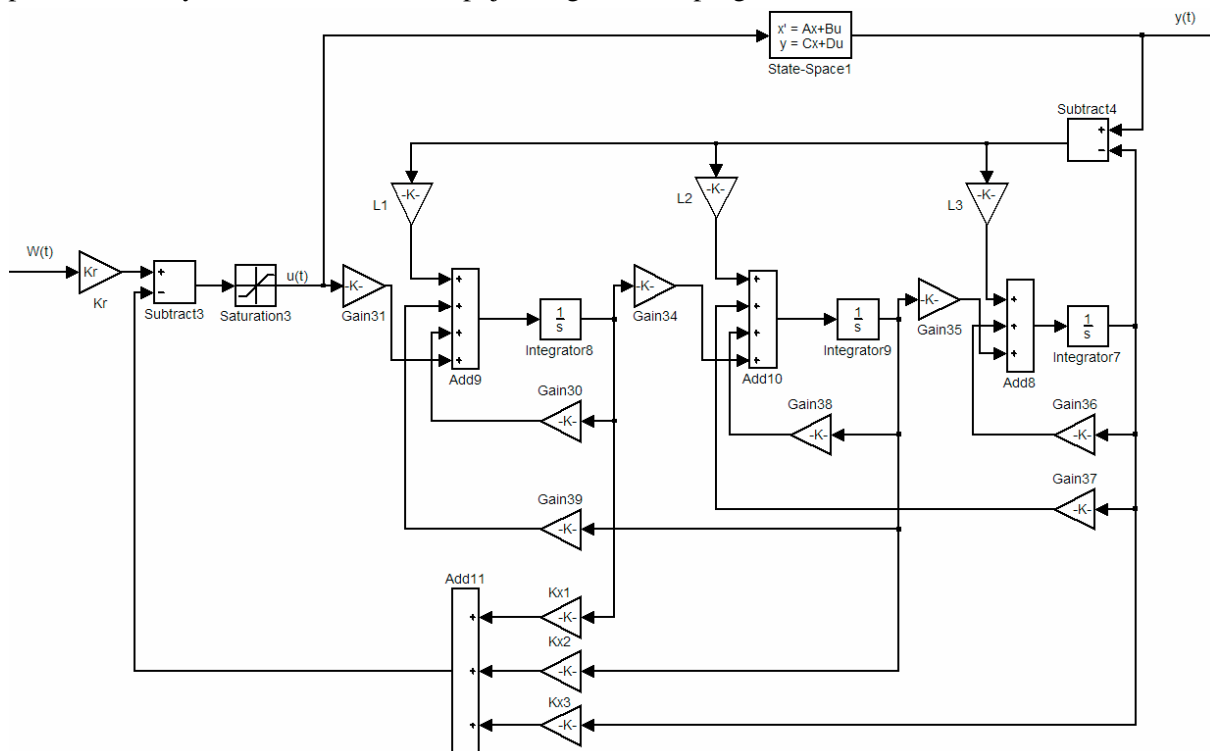
Matrice L se vypočítá podle algoritmu v Matlabu

```
P=3*eig(A);
L=acker(A',C',P')';
```

Výsledek matice L

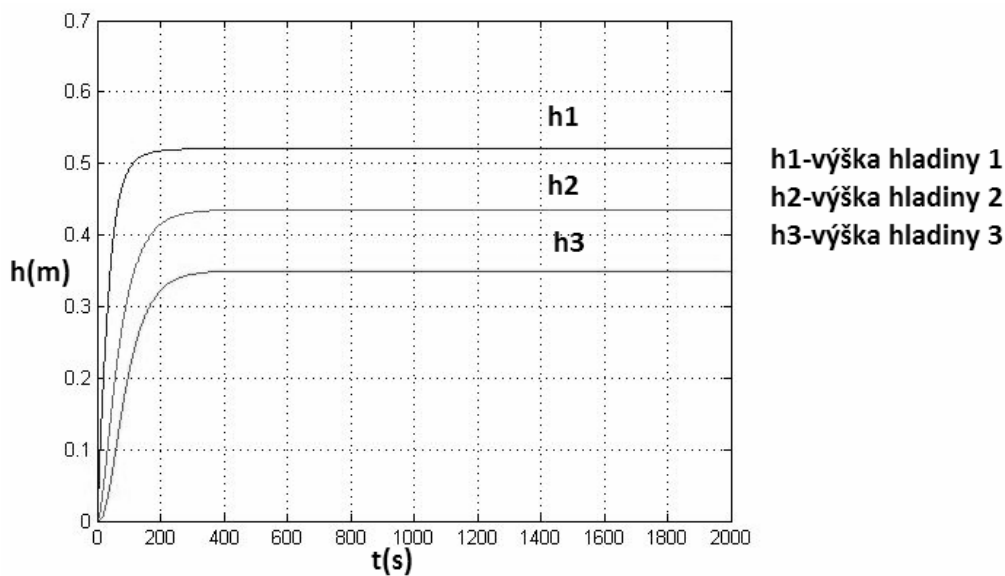
$$L = \begin{bmatrix} 19,0824 \\ 6,0178 \\ 0,7870 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Po vypočtení zesílení prediktivního regulátoru a vypočtení L matice Luenbergerova pozorovatele bylo navrženo schéma zapojení regulátoru v programu Matlab/Simulink.



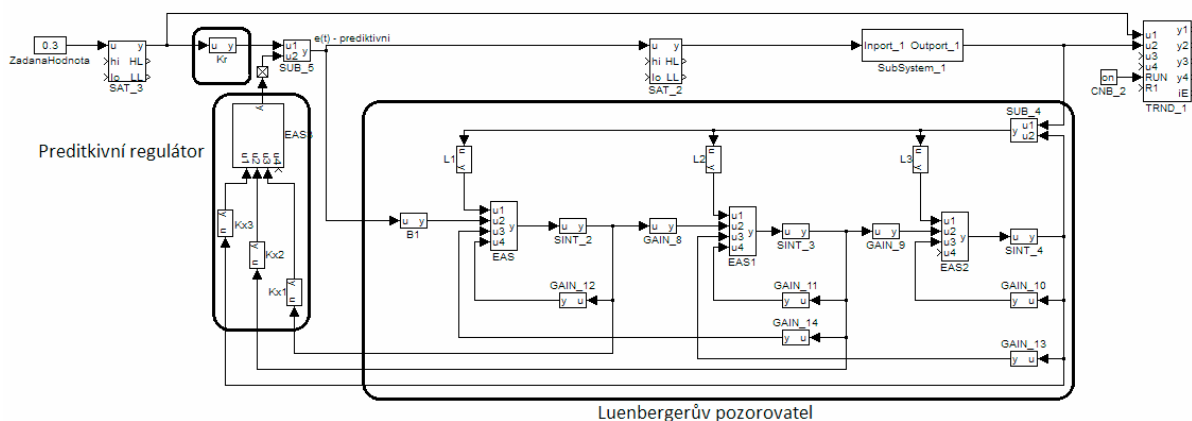
Obr.4.2: Návrh prediktivního regulátoru s Luenbergerovým pozorovatelem

Pro navržený prediktivní regulátor byla provedena simulace přechodové charakteristiky, která je zobrazena na obr. 4.3. Žádaná hodnota je nastavena na 0,35m. Stavby hladin v první a druhé nádrži jsou vypočteny pomocí, již navrženém, Luenbergerova pozorovatele. Z charakteristik vyplývá, že doba ustálení výšky hladiny je až kolem hodnoty $t = 600s$, což je 10min.



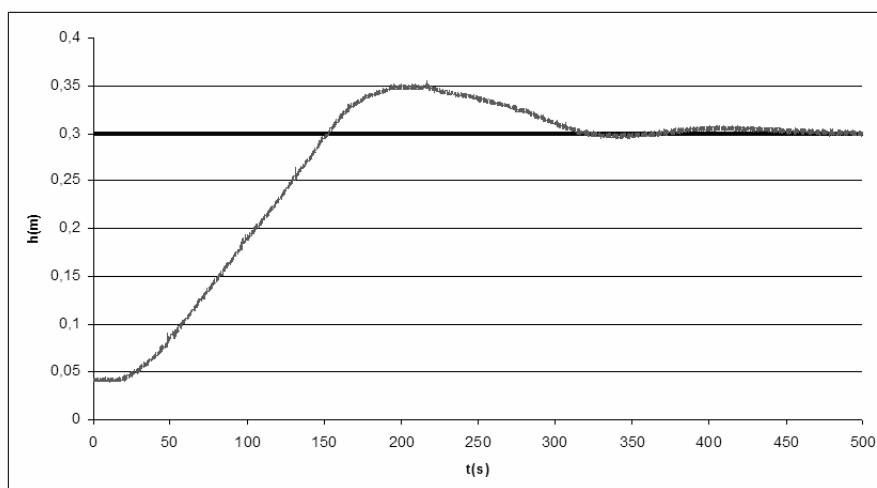
Obr. 4.3: Simulovaná přechodová charakteristika zpětnovazebního řízení s prediktivním regulátorem

Realizace navrženého prediktivního regulátoru pro WinPac-8841 v programu RexDraw s Luenbergerovým pozorovatelem.



Obr.4.4: Realizace prediktivního regulátoru pro model tří nádrží

Naměřená přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu s prediktivním regulátorem je zobrazena na obr. 4.5. Žádaná hodnota je nastavena na 0,3m.

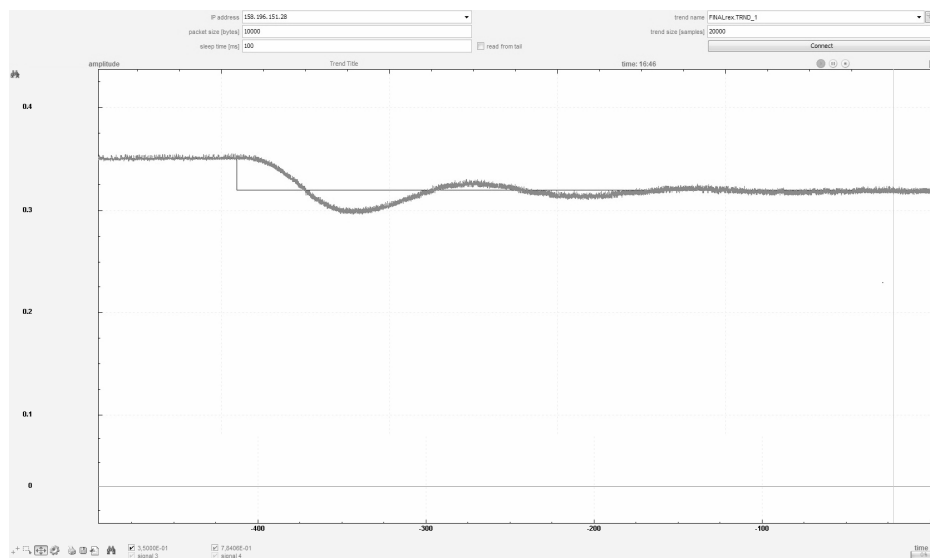


Obr.4.5: Změřená přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu

Z přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu lze vidět, že se hladina v třetí nádrži ustálí po cca 500 vteřinách (8,3min). Ovšem dochází k velkému překmitu, až o 5cm. To je způsobeno tím, že regulátor je navržen v pracovním bodě (4.12):

$$\begin{aligned} h_{10} &= 0,51m \\ h_{20} &= 0,43m \\ h_{30} &= 0,35m \\ Q_0 &= 0.00000823 \frac{m^3}{s} \end{aligned} \tag{4.12}$$

Další přechodová charakteristika je zobrazena na obr. 4.6. Skok z pracovního bodu do bodu 0,32m.



Obr. 4.6: Změřená přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu

4.2 PS regulátor

Dále byl navržen diskretní PS regulátor, pro porovnání vlastností oproti prediktivnímu regulátoru. Pro návrh PS regulátoru bylo třeba navrhnout spojitý PI regulátor a z něj udělat diskretní PS regulátor.

4.2.1 Návrh spojitého PI regulátoru

K návrhu PI regulátoru bylo využito funkce v programu Matlab. Jedná se o funkci *PIDTUNE*, která je dostupná od verze Matlab R2010a.

K návrhu spojitého PI regulátoru, je třeba znát přenosovou funkci soustavy. Model je popsán maticemi:

$$A = \begin{bmatrix} -0.034 & 0.034 & 0 \\ 0.034 & -0.68 & 0.034 \\ 0 & 0.034 & 0.0423 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 704,9 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 0 \quad 1] \quad D = 0 \quad (4.13)$$

Z matic byla dále vypočtena přenosová funkce soustavy pomocí programu Matlab.

`[num,den]=ss2tf(A,B,C,D);`

Kde *num* je čitatel a *den* jmenovatel přenosové funkce. Byla získána přenosová funkce soustavy:

$$G_s = \frac{-6.106e-16s^2 + 8.752e-16s + 0.8142}{s^3 + 0.1442s^2 + 0.004311s + 9.576e-6} \quad (4.14)$$

Když byla známa přenosová funkce soustavy, bylo použito funkce pro výpočet PI regulátoru:

`Gr_PI=pidtune(G,'PI')`

Kde *G* je přenos soustavy a 'PI' je volba typu regulátoru.

Rovnice PI regulátoru:

$$K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (4.15)$$

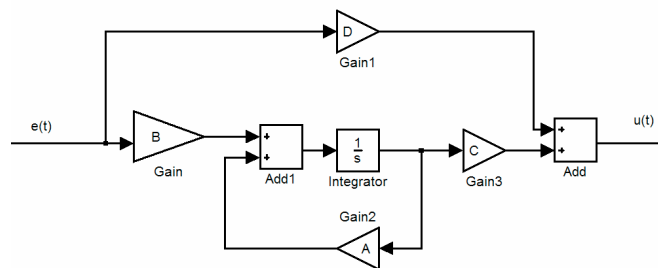
$$K_p = 8,4858e-6, K_i = 4,9515e-8$$

Z rovnice PI regulátoru byla vypočtena přenosová funkce PI regulátoru:

$$Gr_PI = \frac{8,486e-6s + 4,952e-8}{s} \quad (4.16)$$

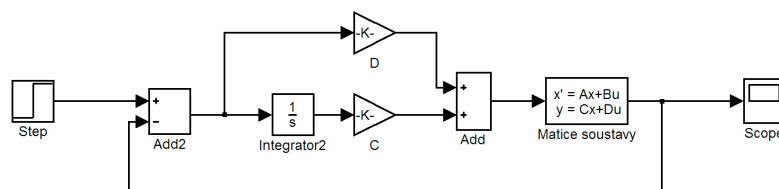
PI regulátor popsán maticemi:

$$A = [0] \quad B = [1] \quad C = [4,9515e-8] \quad D = [8,4858e-6] \quad (4.17)$$



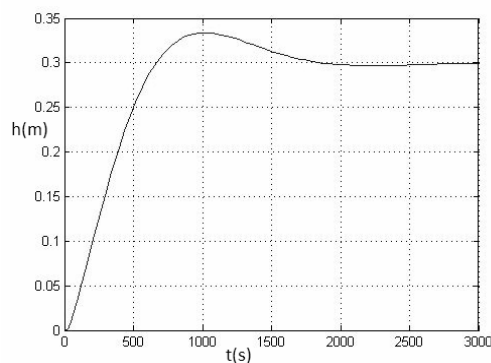
Obr. 4.7: PI regulátor rozkreslený pomocí matic v Simulinku

Dále byl spojitý PI regulátor rozkreslen pouze pomocí základních matematických bloků – integrátor, sčítací člen a zesilovač (násobič). Byl zapojen do zpětnovazebního obvodu s přenosem soustavy. Na vstup byl přiveden jednotkový skok o velikosti 0,3, což odpovídá výšce hladiny v nádrži 30cm. Přechodová charakteristika je zobrazena na obr. 4.9.



Obr. 4.8: Rozkreslený spojitý PI regulátor ve zpětnovazebním zapojení

Z přechodové charakteristiky jde vidět, že se soustava ustálí, je tedy stabilní a je možno spojitý PI regulátor převést na diskretní PS regulátor.



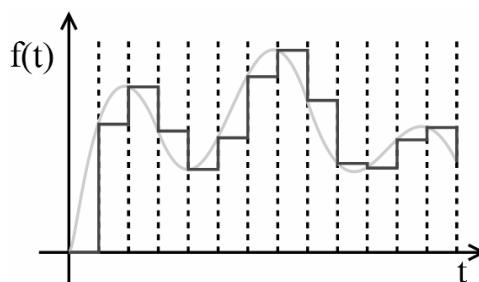
Obr. 4.9: Simulovaná přechodová charakteristika zpětnovazebního obvodu s PI regulátorem

4.2.2 Diskretní PS regulátor a jeho realizace

Při výpočtu diskretního PS regulátoru bylo použito znalostí z již navrženého spojitého PI regulátoru. K výpočtu bylo použito funkce v programu Matlab.

$PS = c2d(Gr, 0.1, 'zoh')$

Kde Gr je přenosová funkce spojitého PI regulátoru (rovnice 4.16), hodnota 0.1 je perioda vzorkování 0,1s a 'zoh' je metoda diskretizace (Zero-order hold on the inputs). Metoda je zobrazena na obr. 4.10.

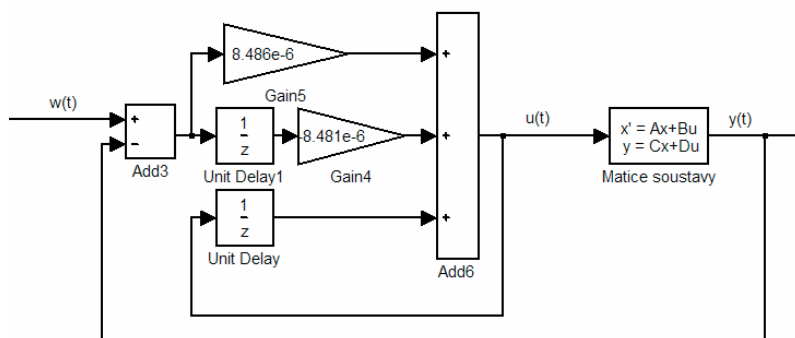


Obr. 4.10: Metoda diskretizace ZOH [8]

Přenos diskrétního PS regulátoru:

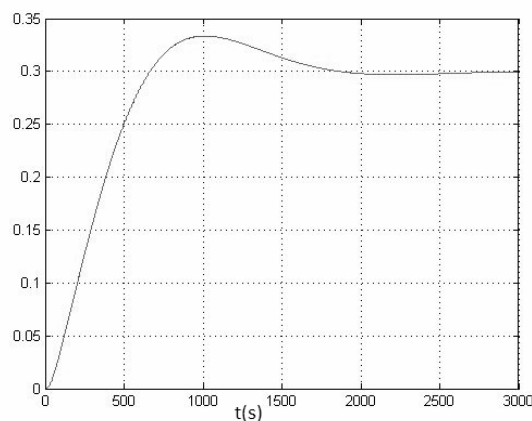
$$Gr_{PS} = \frac{8.486e-6 - 8.481e-6z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.18)$$

Dle přenosu diskrétního PS regulátoru bylo navrženo zapojení v Simulinku, které je zobrazeno na obr. 4.11.



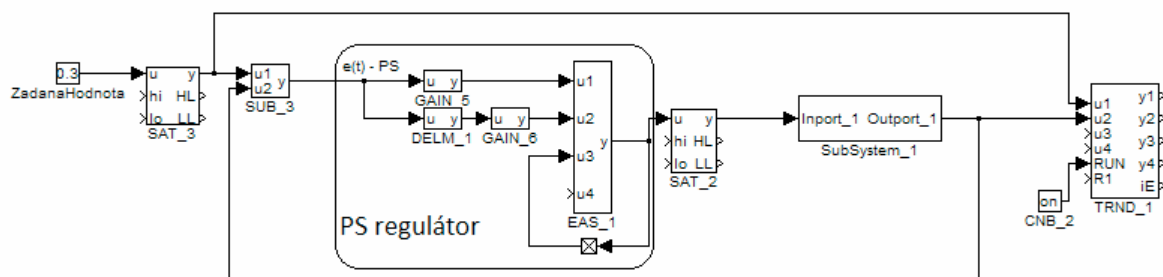
Obr. 4.11: Zapojení diskrétního PS regulátoru ve zpětnovazebním zapojení

Pro ověření správné funkčnosti diskrétního PS regulátoru, byla porovnána jeho přechodová charakteristika s přechodovou charakteristikou spojitýho PI regulátoru. Přechodová charakteristika je zobrazena na obr. 4.12. Z charakteristiky jde vidět, že diskrétní PS regulátor reaguje stejně jako spojitý PI regulátor, charakteristiky se překrývají.

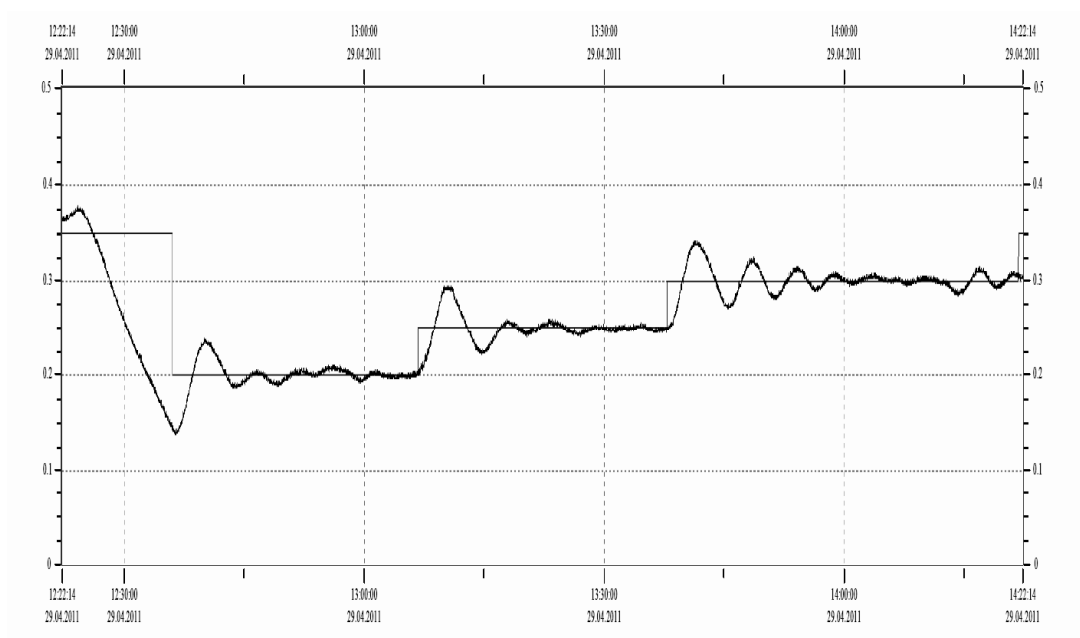


Obr. 4.12: Simulovaná přech. charakteristika PS a PI regulátoru ve zpětnovazebním zapojení

Dále byl diskretní PS regulátor realizován pro WinPac-8841 v programu RexDraw. Naměřená přechodová charakteristika je zobrazena na obr. 4.14. Jde vidět, že dochází ke spoustě překmitů, než se soustava ustálí. I tak není soustava zcela ustálena, dochází k malým kmitům kolem žádané hodnoty.



Obr. 4.13: Diskretní PS regulátor v uzavřeném obvodu



Obr. 4.14: Naměřená přechodová charakteristika PS regulátoru v uzavřeném obvodu

5 Vizualizace

Vizualizace regulace modelu tří nádrží byla vytvořena ve SCADA systému Promotic.

SCADA je zkratkou pro "Supervisory control and data acquisition", tedy Nadřazené ovládání a sběr dat. Obvykle se tento pojem používá pro kontrolní průmyslové systémy umožňující z centralizovaného pracoviště monitorování průmyslových zařízení nebo procesů, včetně možnosti jejich centrálního ovládání: [16]

- Průmyslové procesy, které řídí výrobu a zpracování, běžící stále nebo opakovaně.
- Průmyslové procesy mohou být soukromé nebo veřejné a počítá se mezi ně úprava a rozvod vody, vodní čističky, trubky vedoucí plyn a ropu, elektrické vodiče a rozvaděče, větrné elektrárny, sirény civilní obrany a komunikační systémy.
- Procesy kontrolující HVAC, dostupnost a spotřebu elektrické energie v zařízeních jako jsou letiště, lodě nebo vesmírné stanice.

5.1 Vizualizační program Promotic [17]

SCADA/HMI systém PROMOTIC je komplexní vývojářský nástroj umožňující vytváření aplikací pro vizualizaci, monitorování a řízení technologických procesů v širokém spektru průmyslových odvětví. Tento systém splňuje všechny požadavky kladené na efektivní a spolehlivé SCADA systémy.

- Je určen pro OS Windows 7/Vista/XP/2000/XPe/2003-8Server a novější.
- Umožňuje efektivně vytvářet distribuované a otevřené aplikace v nejrozličnějších odvětvích průmyslu.

V systému PROMOTIC jsou zabudovány všechny nezbytné komponenty pro tvorbu jednoduchých i rozsáhlých vizualizačních a řídicích systémů.

5.1.1 Editor aplikace

Editor aplikace je základním nástrojem tvorby aplikací systému PROMOTIC, slouží k definování stromové struktury PROMOTIC objektů, jejich nastavení, definování algoritmů atd.

Zabudovaný jazyk VBScript se syntaxí Visual Basic slouží pro zápis uživatelských algoritmů v událostním programování, pro přístup k metodám a vlastnostem objektů systému PROMOTIC nebo jiných softwarových aplikací. Pro projektanta to představuje neomezené možnosti vývoje aplikace.

K odladění aplikace je k dispozici informační a diagnostický INFO systém. INFO systém umožňuje prohlížení všech důležitých informací za běhu aplikace. Nabízí se možnost vzdáleného ladění běžících aplikací - v sítích Internet a Intranet přes PROMOTIC Web nebo programy PCAnyWhere, LapLink, CarbonCopy a jiné.

5.1.2 Editor obrazů

Editor obrazů slouží k vytváření grafických obrazů aplikace - skupin libovolného počtu grafických prvků, kterou vytvoří projektant podle svých představ výběrem z palety předdefinovaných prvků. V těchto prvcích lze zadávat jejich statické vlastnosti, popř. tyto vlastnosti napojit datovou vazbou a oživit tak vytvářenou vizualizaci. Napojit datovou vazbou lze všechny důležité vlastnosti grafických prvků: barva, poloha, velikost, hodnota a mnoho dalších.

Podpora tvorby vlastních složených grafických prvků a import/export do XML (do textových dat) přináší úsporu práce projektanta a rychlou tvorbu aplikace.

Uživatel může vytvářet obrazy, které jsou standardními Windows okny, ale může definovat okna s pevnou pozicí, pevnou velikostí, okna aplikace přes celou obrazovku, bez okenních lišt nebo definovat maximální počet současně otevřených oken.

5.1.3 Promotic a Internet

PROMOTIC umožňuje vzdálené prohlížení aplikace pomocí Internet Exploreru.

Je zpřístupněno nabízení obrazů v podobě automaticky generovaných dynamických HTML stránek, včetně zpětných zásahů a ovládní. Tyto dynamické stránky obrazů se automaticky vytvářejí ve vývojovém prostředí při překladu obrazu a jsou uchovány v datovém souboru aplikace. Z aplikace lokální tak může projektant udělat aplikaci síťovou během několika minut.

Na vzdáleném počítači PC je dále umožněno prohlížet v reálném čase v "obyčejném" internetovém prohlížeči průběhy trendů, zobrazovat alarmy a události aplikace.

PROMOTIC Web server zajišťuje přenosy dat a jejich zabezpečení pomocí konfigurace uživatelů a oprávnění.

Všechny přenosy jsou postaveny na HTTP protokolu (lehce průchozí přes firewall).

5.1.4 Promotic a otevřenost

Systém PROMOTIC se vyznačuje zcela otevřenou architekturou systému. Zabudovaná standardní softwarová rozhraní: XML, ActiveX, ODBC, DAO, OLE, OPC, DDE, TCP/IP, WEB dovolují plnou integraci systému PROMOTIC s dalšími softwarovými produkty. Díky této koncepci je například možné přímé propojení systému PROMOTIC na podnikové databáze (MS SQL, MySQL, DBase, Access, Oracle, SAP a další), propojení s komunikačními servery, případně s jinými softwarovými systémy.

5.1.5 Promotic a trendy

Součástí systému PROMOTIC je výkonný systém trendů. Je to ukládání hodnot vybraných veličin s časovou značkou buď do paměti, nebo na disk počítače tak, že lze následně tyto hodnoty zobrazovat graficky nebo tabulkově jako časové průběhy těchto veličin nebo je získávat pro další analýzu.

- Vybrané veličiny jsou ukládány ve formátu DBase, Access, binární PROMOTIC, MS SQL Server, MySQL, Oracle.
- Prohlížení trendů lze v sítích internet/intranet v Internet Exploreru.
- Lze nastavit zda hodnoty ukládat pravidelně, přírůstkově nebo jen na přání.
- V jednom trendu lze prohlížet trendy z více aplikací na různých počítačích.
- Lze velmi obecně nastavovat tvarový i barevný vzhled jednotlivých průběhů.

5.1.6 Promotic a komunikace

Aplikace zaměřená na monitorování a řízení technologických procesů získává nebo ukládá data z/do externích zdrojů. Zdrojem takových hodnot může být například databáze, PLC automat, soubor na disku, vstupní/výstupní karta do PC, jiný server na lokálním nebo vzdáleném PC atd.

- Pro tvorbu decentralizovaných aplikací v sítích Internet a Intranet jsou k dispozici komunikační rozhraní s protokoly TCP/IP, HTTP, XML, DCOM.

5.2 Vizualizační aplikace modelu tří nádrží – jednotlivé bloky

5.2.1 OPC server/klient

Ke komunikaci mezi programovatelným automatem WinaPAC a řídicím PC, na kterém běží řídicí aplikace, bylo využito OPC serveru.

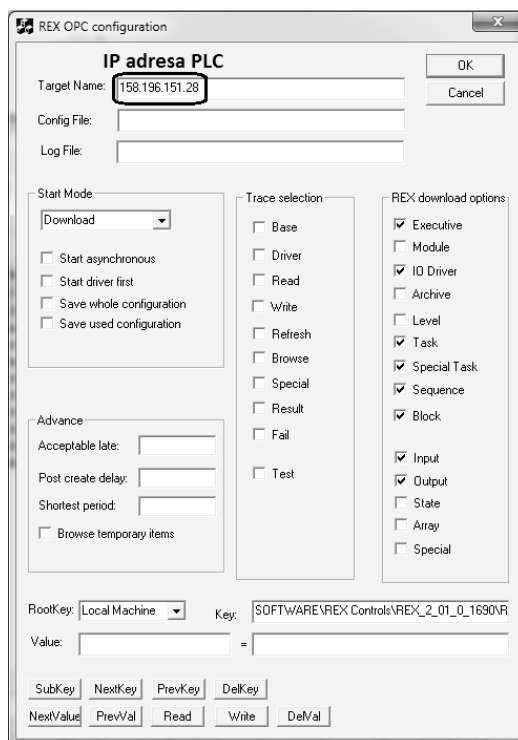
OPC

OPC (OLE for Process Control) je komunikační protokol, jehož cílem je vytvořit jednotné komunikační rozhraní mezi hardware a software produkty průmyslové automatizace. Uživatelé mohou díky OPC začlenit do svých projektů hardware a software různých výrobců bez ohledu na komunikační rozhraní těchto komponent. Jedinou podmínkou je existence OPC rozhraní pro obě strany, neboli existence příslušného OPC Serveru pro použitý hardware a rozhraní OPC Klient u použitého software. [18]

OPC Server / OPC Klient

Komunikační protokol OPC je založen na architektuře Klient - Server. Hovoříme-li o OPC, hovoříme primárně o dvou typech programů - o OPC Serveru a OPC Klientu. Oba programy jsou software aplikace. [18]

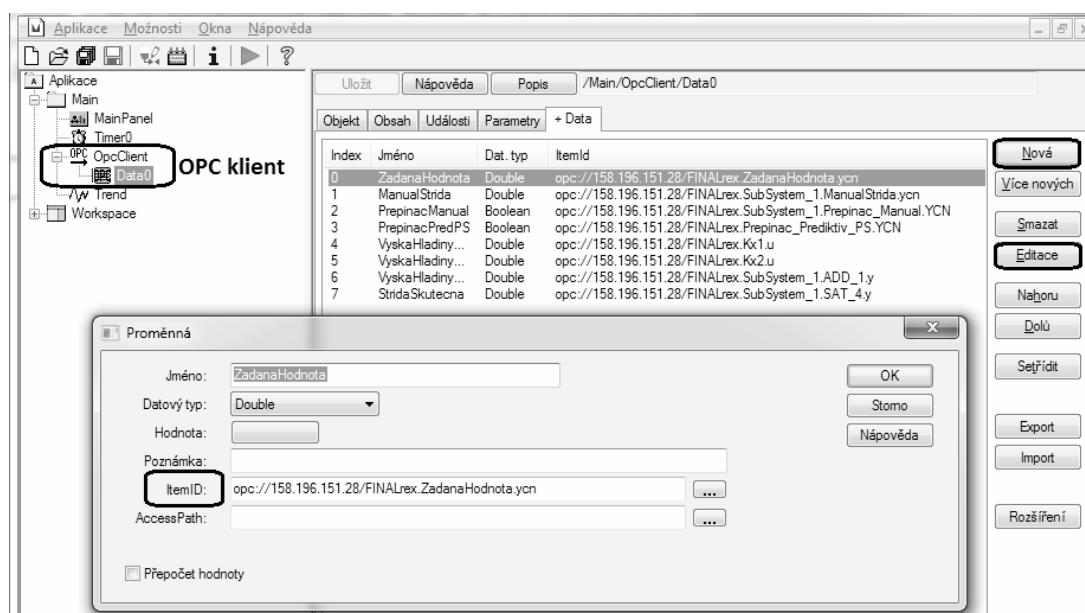
Nastavení OPC serveru v řídicím systému REX. K tomu slouží aplikace *RexOPCcfg.exe*. Nastavení je zobrazeno na obr. 5.1. Do pole Target Name se vepíše IP adresa daného PAC, v tomto případě je IP adresa: **158.196.151.28**.



Obr. 5.1: Nastavení OPC serveru v řídicím systému REX

Po nastavení OPC serveru nastaven, bylo třeba v programu Promotic vytvořit OPC klienta. Do aplikace byl vložen nový objekt typu OPC klient – *PmOpcClient*. Dále bylo nastaveno **OPC server – CLSID/ProgID: REXControls.RexOPCsvr**.

Po nastavení OPC klienta, byly do něj vloženy patřičné data. Do *OpcClienta* byl vložen nový objekt typu OPC klient data – *PmOpcClientData*. V záložce +Data byly přidány patřičné data z PAC důležitá pro řízení modelu. Jednotlivá data byla vložena pomocí tlačítka Nová (popř. Editace k již vytvořeným datům) a vybráním dané ItemID z OPC serveru. Jako příklad je uvedena hodnota žádané hodnoty (obr. 5.2).



Obr. 5.2: OPC klient a data

5.2.2 Trend

Pro zobrazování přechodových charakteristik bylo třeba do vizualizační aplikace vložit Trend. Do hlavní aplikace byl vložen nový objekt typu Skupina trendů – *PmTrend*. V záložce +Data byla vybrány dvě hodnoty, které byly třeba zobrazovat (Skutečná výška hladiny ve třetí nádrži a Žádaná hodnota výšky hladiny třetí nádrže).

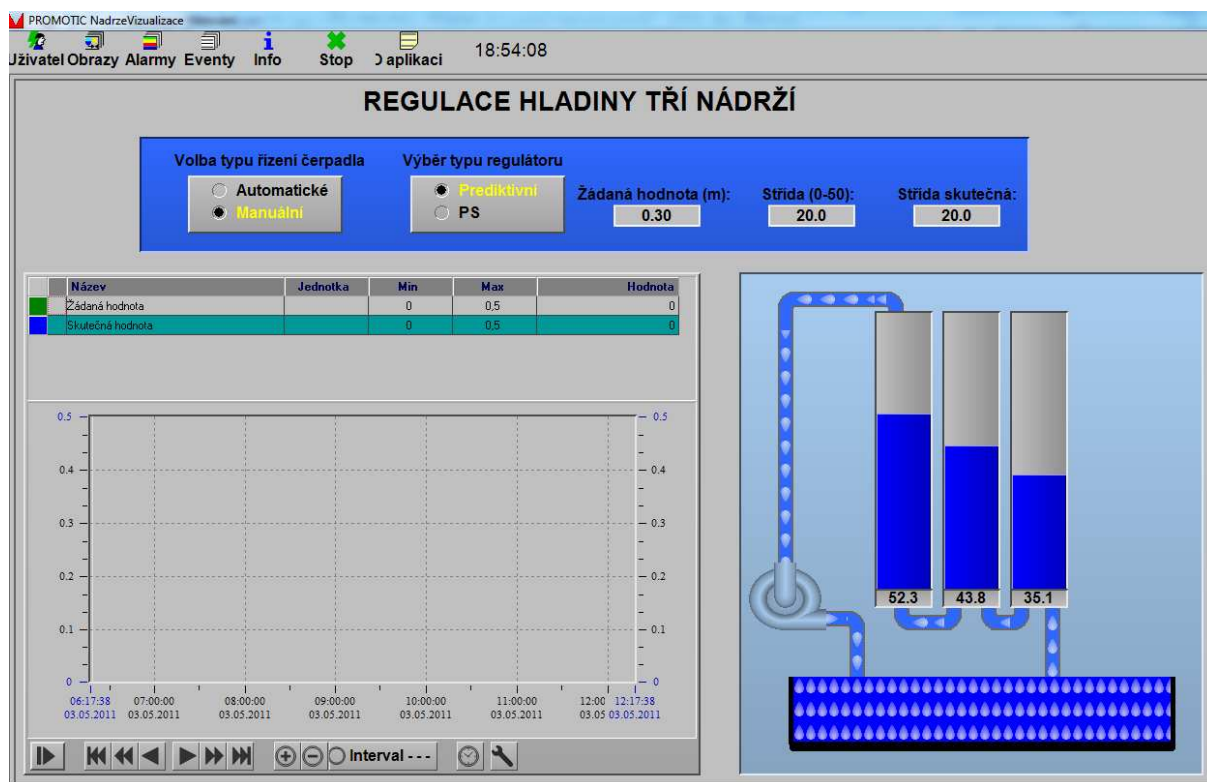
Pro vykreslování hodnot v trendu bylo třeba vložit časovač. Ten byl vložen opět do hlavní aplikace. Nový objekt typu Časovač – *PmTimer*. Do záložky +Události se byla vložena funkce *pMe.Pm("../Trend").Run*.

Pro automatické zobrazení obou hodnot v trendu při spuštění aplikace, bylo použito následujícího postupu vložení hodnot do trendu. V hlavním grafickém panelu, kde je Trend vložen jako grafický prvek, bylo postupně procházeno k vlastnosti *TRENDS*. Po zobrazení hlavní nabídky trendu se postoupilo dále do:

- Vložené prvky -> *AxTrendsView*; *PmiAx* -> Události a z nabídky se vybrala záložka *TRENDS*. Tam byly přidány požadované hodnoty k zobrazení v Trendu.

5.2.3 Hlavní grafické okno

Hlavní grafický panel, zobrazen na obr. 5.3, byl rozdělen do tří částí. První část slouží k nastavování zobrazení hodnot, sloužících k řízení soustavy. Druhé okno slouží k vykreslování požadovaných hodnot v grafu (trend). V třetí části je vlastní vizualizace modelu tří nádrží.



Obr. 5.3: Vizualizace modelu tří nádrží

Ovládací část

K řízení soustavy je možno použít dva typy, automaticky nebo manuálně. Pokud je zvolena možnost Manuální, napouštění vody se nastavuje pomocí EditBoxu Střída (0-50). Do okna se zadá hodnota ve velikosti 0-50. Přičemž 0 znamená, čerpadlo je vypnuto.

Pokud je zvolena možnost Automatické, napouštění vody je závislé na Žádané hodnotě, která je v rozsahu 0-0,4, a typu zvoleném regulátoru. K regulaci soustavy jsou navrženy dva typy regulátorů – Prediktivní a diskretní PS regulátor.

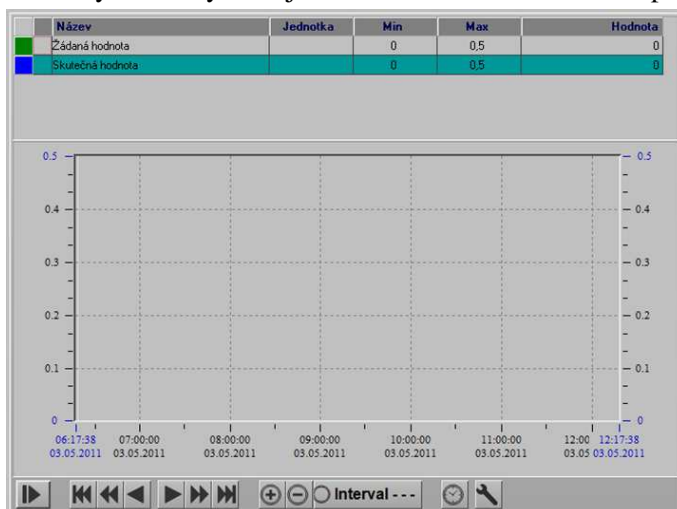
Ve třetím EditBoxu, který slouží pouze pro zobrazování hodnoty, se zobrazuje hodnota Střída skutečné řídící čerpadlo.



Obr. 5.4: Ovládací část vizualizační aplikace

Trend

V trendu jsou zobrazeny hodnoty požadované veličiny a skutečné veličiny. Slouží k zobrazení přechodových charakteristik při automatickém řízení soustavy. Hodnoty se dají zobrazovat buďto graficky nebo tabulkově. Grafy i tabulky se dají ukládat a tisknout rovnou z aplikace.

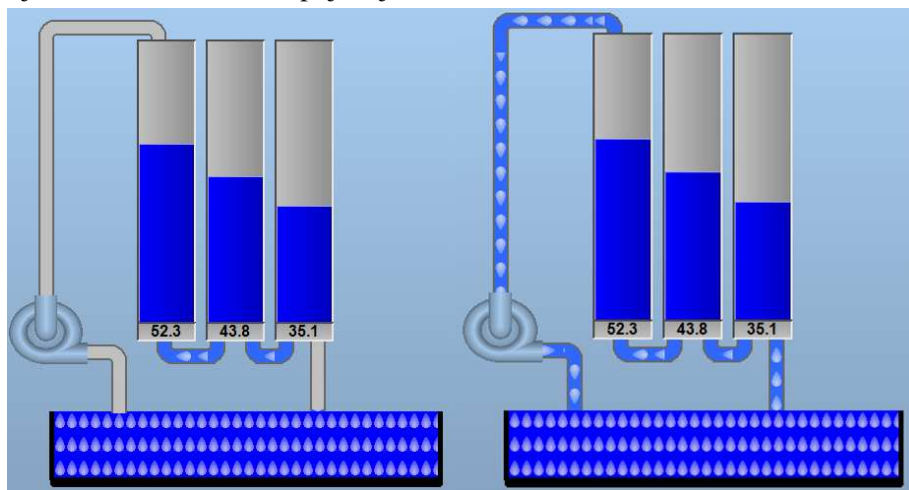


Obr. 5.5: Trend

Vizualizace modelu

Vizualizace zobrazuje stav hladin v nádržích a stav čerpadla. Hodnoty v prvních dvou nádržích nejsou skutečné, jsou použity hodnoty z Luenbergerova pozorovatele. Hodnota v třetí nádrži je skutečná hodnota, která je měřena snímačem. Pod nádržemi jsou editboxy zobrazující jednotlivé hodnoty výšek hladin v nádržích.

Z čerpadla vede „hadička“ do první nádrže. Pokud je čerpadlo spuštěno, „hadička“ se naplní vodou. K tomu bylo použito prvku PmPipe – proudění kapka. Totéž platí pro spojení nádrží a odtok z třetí. Pokud je v nádržích voda, ve spojích je zobrazena voda.



Obr. 5.6: Vizualizace modelu pro vypnuté a zapnuté čerpadlo

6 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření regulátoru pro fyzikální model tří nádrží pomocí kompaktního programovatelného automatu WinPac-8000. Nejprve bylo zapotřebí vytvořit matematický model soustavy. Soustava je nelineární, proto ji bylo třeba linearizovat v pracovním bodě do Taylorova rozvoje. Poté jsem se seznámil s moderními metodami řízení, mezi které zapadá LQG, LQR, prediktivní regulace a jiné. Jako nejvhodnější pro tento model jsem volil prediktivní regulátor.

Při návrhu jsem postupoval podle vztahů uvedených v kapitole zabývající se výpočtem prediktivního regulátoru, bylo třeba vytvořit algoritmus pro výpočet regulátoru. Jelikož prediktivní regulátor je stavový, a nebyly známy všechny stavy modelu, bylo třeba vytvořit Luenbergerova pozorovatele. Navržený regulátor byl simulován v programu Matlab/Simulink. Řídicí systém REX neumí pracovat s maticemi, proto bylo třeba navržený model rozkreslit pouze pomocí základních matematických operandů. Velkou výhodou řídicího systému REX je, že lze vytvořit model přímo v Simulinku a vytvořený návrh rovnou simulovat. Po realizaci na WinPac byly naměřeny přechodové charakteristiky regulované soustavy. Jedna přechodová charakteristika zobrazuje skok z hodnoty 0 na požadovanou výšku hladiny 35cm. Druhá zobrazuje skok z pracovního bodu, což je 35cm ve třetí nádrži na požadovaných 32cm.

Dále pro porovnání vlastností regulátoru jsem navrhl diskrétní PS regulátor. Přechodová charakteristika je skoky od 20cm do 25cm a do 30cm.

Dle předpokladů, z přechodových charakteristik jasně vyplývá, že prediktivní regulátor dosáhl lepších výsledků než diskrétní PS regulátor. I když dochází k velkému prvnímu překmitu, tak se soustava ustálí po dalších dvou malých překmitech.

Při řešení úlohy jsem zjistil, že velkou nevýhodou prediktivního regulátoru navrženého pro model tří nádrží je velká citlivost na změnu odtoku z třetí nádrže. I drobné nečistoty ve vodě, ucpávající odtok, mají nezanedbatelný vliv na výsledky regulace.

Z tohoto důvodu se také chování soustavy oproti matematickému modelu lišilo více než bylo očekáváno. Odtok třetí nádrže byl větší, než byla očekávaná hodnota. Proto byl k odtokové hadičce připojen regulační ventil, kterým se provedla korekce rychlosti odtoku tak, ať lépe koresponduje s hodnotou rychlosti vypočtenou pomocí Torricelliho vzorce.

Prediktivní regulátor je výbornou volbou pro řízení složitých soustav, ovšem je velmi důležité získat co nejpřesnější matematický model dané soustavy.

7 Použitá literatura

- [1] Stručný popis systému REX. In [online], 2003 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/Strucny_popis_systemu_REX.pdf>
- [2] Jednoduchý prediktivní regulátor s omezením akční veličiny. In SCHLEGEL, Miloš; SOBOTA, Jaroslav. *Jednoduchý prediktivní regulátor s omezením akční veličiny* [online]. 2006 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.rexcontrols.com/downloads/clanky/PIDsuccessor.pdf>>
- [3] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systému*. 1. vyd. Ostrava: MONTANEX, a.s., 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2
- [4] ROUBAL, J., PEKAŘ, J., PACHNER, D., HAVLENA, V.: *Moderní teorie řízení*. Vydavatelství ČVUT, 2005
- [5] *Mathworks.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. Matlab. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/techdoc/>>
- [6] *Funkční bloky systému REX : Referenční příručka* [online]. Verze 2.01. Plzeň : [s.n.], 16.3.2011 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <www.rexcontrols.cz>
- [7] *Icpdas.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. WinPAC-8000. Dostupné z WWW: <<http://www.icpdas.com/products/PAC/winpac/introduction.htm>>
- [8] Zero-order hold. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 5.7.2009, last modified on 14.3.2011 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-order_hold>
- [9] Zubové čerpadlo. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2.1.2011, last modified on 2.1.2011 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zubové_čerpadlo>
- [10] *Ifm :: O1D102 - O1DLF3KG* [online]. 5.10.2010 [cit. 2011-05-05]. Senzor O1D102. Dostupné z WWW: <<http://www.ifm.com/ifmcz/web/dsfs/O1D102.html>>
- [11] Pulzně šířková modulace. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 3.1.2011, last modified on 3.1.2011 [cit. 2011-05-06]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzně_šířková_modulace>
- [12] ŠTĚPÁN, Lukáš. *Stepa.wz.cz* [online]. 24.6.2007 [cit. 2011-05-05]. PWM regulátor. Dostupné z WWW: <<http://stepa.wz.cz/index.php?page=PWM>>
- [13] coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=6447
- [14] *Skoda-dily.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-06]. Čerpadlo ostřikovače skel. Dostupné z WWW: <<http://www.skoda-dily.cz/nahradni-dil/115930290-cerpadlo-ostrikovace-skel-favorit.html>>
- [15] *Ifm :: O1D102 - O1DLF3KG* [online]. 5.10.2010 [cit. 2011-05-05]. Senzor O1D102. Dostupné z WWW: <<http://www.ifm.com/ifmcz/web/dsfs/O1D102.html>>
- [16] SCADA. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.3.2011 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/SCADA>>
- [17] *Promotic.eu* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. Co je PROMOTIC?. Dostupné z WWW: <<http://www.promotic.eu/cz/promotic/scada-pm.htm>>
- [18] *Foxon.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. Co je OPC?. Dostupné z WWW: <http://www.foxon.cz/index.php?main_page=faq_info&fcPath=29&faqs_id=91>

8 Seznam příloh

Příloha I – CD-ROM disk

Příloha I – CD-ROM disk

Přílohou této diplomové práce je CD-ROM disk, který obsahuje následující soubory:

- *Diplomová_práce_PRE084.pdf* – jedná se dokument této diplomové práce ve formátu *.pdf*.
- Složka Matlab – v ní se nachází zdrojový kód pro program Matlab2010b navržený k výpočtu linearizace soustavy modelu tří nádrží, prediktivního a diskrétního PS regulátoru. Dále modely pro Simulink k simulaci navržených regulátorů.
- Složka REX – ta obsahuje finální verzi programu k řízení modelu tří nádrží.
- Složka Promotic – ta obsahuje vizualizaci programu pro řízení modelu tří nádrží